

# 黄河砭砂岩区 2000—2023 年土地利用变化的地形梯度效应

梁通<sup>1</sup>, 张璐<sup>1</sup>, 曹倡景<sup>1</sup>, 张攀<sup>2</sup>, 杨文杰<sup>1</sup>, 韩珈琦<sup>1</sup>

(1.华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046; 2.黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:** [目的] 探究黄河砭砂岩地区 2000—2023 年 23 a 间各地形因子对土地利用格局的梯度效应, 为该区域植被恢复重建工作和土地利用优化调控提供理论指导。[方法] 运用遥感数据提取高程、坡度、地形位等重要地形因子, 结合 GIS 定量分析, 分析各地形因子对土地利用格局的梯度效应, 探究土地利用类型的地形综合指数的分级演变。[结果] ①研究区土地利用类型以草地为主, 2000—2023 年林地、建设用地面积变化最为剧烈, 耕地、未利用地次之, 林地增加 10.48 km<sup>2</sup>, 建设用地面积增加 295.40 km<sup>2</sup>, 其来源多为耕地与草地; 耕地、未利用地面积分别减少 1 716.52 和 758.89 km<sup>2</sup>, 草地增加 548.12 km<sup>2</sup>。②研究区土地利用空间分布呈现鲜明的梯度性特征, 耕地、建设用地以及未利用地的优势分布主要在低地形位区域; 林地的主要优势区分布在高地形位; 草地主要优势区分布集中在中、高地形位区域; 水域优势分布区域在低、高地形位。③2000 年土地利用程度综合指数最高为 220.99, 最低为 205.69; 2023 年土地利用程度综合指数最高为 230.17, 最低为 203.36; 除 1 和 2 级地形位外, 2023 年土地利用程度综合指数均明显低于 2000 年, 23 a 来土地利用程度的变化与人类活动紧密相关。[结论] 2000—2023 年黄河砭砂岩区地形梯度特征明显, 土地利用类型在地形梯度上的时空变化显著。在充分考虑当地各地形因子的条件下, 可以加强退耕还林、还草等政策实施、持续优化布局。

**关键词:** 黄河砭砂岩区; 土地利用; 地形梯度; 地形位指数; 地理信息系统

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0327-10

中图分类号: F301.24

**文献参数:** 梁通, 张璐, 曹倡景, 等. 黄河砭砂岩区 2000—2023 年土地利用变化的地形梯度效应[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 327-336. Liang Tong, Zhang Lu, Cao Changjing, et al. Topographic gradient effect of land use change at arsenic sandstone area in Yellow River basin from 2000 to 2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 327-336. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.034; CSTR:32312.14. stbctb.2025.01.034.

## Topographic gradient effect of land use change at arsenic sandstone area in Yellow River basin from 2000 to 2023

Liang Tong<sup>1</sup>, Zhang Lu<sup>1</sup>, Cao Changjing<sup>1</sup>, Zhang Pan<sup>2</sup>, Yang Wenjie<sup>1</sup>, Han Jiaqi<sup>1</sup>

(1.College of Surveying and Geographic Information, North China University of

Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2.Yellow River

Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, Henan 450043, China)

**Abstract:** [Objective] The gradient effects of different topographic factors on land-use patterns over 23 years from 2000 to 2023 at the arsenic sandstone area of the Yellow River were analyzed in order to provide theoretical guidance for vegetation restoration and land use optimization in this area. [Methods] Using remote sensing data to extract critical topographic factors, such as elevation, slope, and topographic position, and combining these with GIS-based quantitative analysis, the gradient effects of various topographic factors on land-use patterns were analyzed, and the graded evolution of land-use types according

收稿日期: 2024-06-12

修回日期: 2024-10-15

采用日期: 2024-10-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“砭砂岩区坡沟系统微地形—土壤—植被空间耦合机理研究”(32101591); 河南省科技攻关项目“黄河流域(河南段)水土资源时空耦合规律及多维优化调控机制研究”(232102321108)

第一作者: 梁通(1997—), 男(汉族), 山西省平遥县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与生态遥感。Email: 201601525@stu.ncwu.edu.cn.

通信作者: 张璐(1982—), 女(汉族), 河南省郑州市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持和生态遥感方面的研究。Email: zhanglu@ncwu.edu.cn.

to a comprehensive topographic index was explored. [Results] ① Grassland was the dominant land use type in the study area, and from 2000 to 2023, the areas of forestland and construction land underwent the most significant change, followed by cultivated land and unused land. Forestland increased by 10.48 km<sup>2</sup>, whereas construction land increased by 295.40 km<sup>2</sup>, mainly from the cultivated land and grassland. The cultivated and unused land areas decreased by 1,716.52 km<sup>2</sup> and 758.89 km<sup>2</sup>, respectively, while grassland increased by 548.12 km<sup>2</sup>. ② The spatial distribution of land use in the study area exhibited distinct gradient characteristics; cultivated land, construction land, and unused land were primarily distributed in low topographic positions, forestland was mainly located in high topographic positions, and grassland was concentrated in mid-to high-elevation areas. Meanwhile, the water bodies were predominantly found in both low and high topographic positions. ③ In 2000, the highest comprehensive land use index was 220.99, and the lowest was 205.69. By 2023, the highest index was 230.17, and the lowest was 203.36. Except for Levels 1 and 2, the comprehensive land use index in 2023 was significantly lower than that in 2000. Over the past 23 years, land use changes have been closely related to human activities. [Conclusion] From 2000 to 2023, the arsenic sandstone area of the Yellow River exhibited evident topographic gradient characteristics, with significant spatiotemporal changes in land-use types along the topographic gradient. Considering the influence of local topographic factors, it is advisable to strengthen the implementation of policies, such as returning farmland to forests and grasslands, and to optimizing the land use layout continuously.

**Keywords:** arsenic sandstone area of Yellow River; land use; topographic gradient; topographic index; geographic information system (GIS)

土地利用是全球环境变化的一个核心问题<sup>[1]</sup>,其时空格局演变涉及社会、经济、生态和地理等因素的复杂交互效应。地形因素通过参与土壤侵蚀作用来影响区域土地利用时空格局演化进程<sup>[2]</sup>,不仅影响地表物质迁移和能量转换,还影响各种土地利用类型的分布和转变。近年来,土地利用/土地覆被与地形的耦合效应备受关注<sup>[3]</sup>,当前研究多聚焦于地形位与分布指数的构建<sup>[4]</sup>,综合运用“3S”<sup>[5]</sup>、景观格局指数<sup>[6]</sup>和地理探测器<sup>[7]</sup>进行地形因子定量分析,借助 DEM 来研究坡度、坡向、高程等单一地形因子条件下的土地利用变化<sup>[8]</sup>。相关研究涉及了洛河<sup>[9]</sup>、红河<sup>[10]</sup>、渭河<sup>[11]</sup>等特定流域;岷江上游<sup>[12]</sup>、北洛河<sup>[13]</sup>、哈尼梯田<sup>[14]</sup>和安塞区<sup>[15]</sup>以及珠穆朗玛峰国家级自然保护区等<sup>[16]</sup>自然和生态经济区域<sup>[17]</sup>,针对性分析了不同地域地形因子对土地利用的影响,深刻影响着地表的水文过程、土壤性质<sup>[18]</sup>、植被分布<sup>[19]</sup>,但在多地形因子复合作用的研究上仍有一定局限性<sup>[20]</sup>。本研究探讨不同地形梯度上的土地利用结构及其变化特征,基于地形梯度效应分析其土地利用时空格局,厘清土地利用在地形因子影响下的分布变化规律,在不同地形梯度背景下,土地利用变化的特征与模式呈现出显著的差异性。进而对土地利用格局的演变产生多层次、非线性的调控作用。

砒砂岩区广泛分布于中国黄土高原北部,该区域地处高原,受重力、风力侵蚀严重,沙粒结构疏松和岩

石强度弱,在湿润条件下呈泥状,风起时易形成沙丘,水土流失极其严重<sup>[21]</sup>。生态极度脆弱,且由于独特的环境,该区域植被稀疏,种类稀少地形复杂,形成了特殊的土地利用格局,具有独特的地形梯度特征。砒砂岩区问题是黄河流域生态修复以及高质量发展的掣肘,亟需有效治理<sup>[22]</sup>。探明该区域不同地形梯度背景下的土地利用时空格局,对于砒砂岩区这一独特地貌类型的水土防治,生境修复,都有极为重要的作用。为此,本研究以黄河砒砂岩区为研究对象,基于土地利用数据以及 DEM 数据,分析 2000—2023 年土地利用时空格局、土地利用变化特征以及地形梯度效应,探明地形因子对土地利用分布变化的影响规律,以期优化该地区土地利用方向、保护水土和生态修复提供科学支撑。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区概况

黄河砒砂岩区位于黄河中游,地处鄂尔多斯高原,内蒙古、山西、陕西三省交界区,总面积  $1.67 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,年均降水量在 240~470.5 mm,植被平均覆盖度约 30%,以干旱草原为主,该地区主要以中海拔丘陵地貌为主,地形表现为多沟壑、地形起伏变化剧烈,多陡坡,地形破碎,且该区域地质条件极为恶劣,成岩程度低、岩层风化严重,极易发生风化侵蚀,干旱时坚硬无比,遇水时却软烂如泥,加之全年的降水较为集中,

水力侵蚀严重;春季冬季昼夜温差较大,长时间处于冻融交替,故而冻融侵蚀也极为严峻。冻融侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀构成的复合侵蚀,导致该区域生态极度脆弱。该地区植被稀疏,植被种类主要是柠条、沙棘、油松和侧柏等人工植被。水土流失问题十分严重<sup>[23]</sup>。

## 1.2 数据来源与处理

以黄河砒砂岩区 2000 和 2023 年的中国科学院 30 m 分辨率遥感影像为数据源(2000 年使用 Landsat-TM 遥感图像为信息源,2023 年使用 Landsat-8 遥感数据为信息源),通过 ArcGIS 软件进行遥感影像校正,依据土地利用/覆被分类系统准则和全国土地资源三级分类系统的标准将研究区划分为 6 类土地类型:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,生成 2000 和 2023 年土地利用图,提取土地利用面积,分析土地利用格局时空变化。DEM 选用 SRTM-DEM 30 m 分辨率数据,使用 ArcGIS 10.8 提取高程、坡度、地形位指数等地形因子,采用 WGS\_1984 坐标系进行校正,探明不同地形梯度分布规律。将土地利用图分别与坡度、高程及地形位指数分级图叠

加,揭示不同地形梯度与土地利用耦合效应。

## 2 研究方法

### 2.1 地形因子分级

基于黄河砒砂岩区土地利用状况和地形特征,对研究区高程、坡度以及地形位指数 3 种地形因子在 ArcGIS 中分别进行细致分级处理(图 1)。高程分级方法为 Equal Interval,结合研究区土地利用分布特征,具体分级如下:研究区海拔分布区间为 774~1 648 m,低于 1 000 m、高于 1 400 m 的区域土地利用表现为较单一,故被独立归为一个级别;而在海拔为 1 000~1 400 m 区间,以 100 m 为间隔进行等级划分。坡度分级方式参照土地利用现状调查技术规范中的坡度分级规则,并结合该砒砂岩地区的实际地貌特征,研究区坡度范围为 0°~64°,分级过程中,划为 6 个坡度级别<sup>[24]</sup>。地形位指数的计算结果在 0.21~1.17,借鉴已有的研究成果的基础上,使用 ArcGIS 软件中的重分类工具,根据间隔数据相等的原则,按照 Equal Interval 方法,将地形位指数精细划分为 6 个等级<sup>[4]</sup>(表 1)。

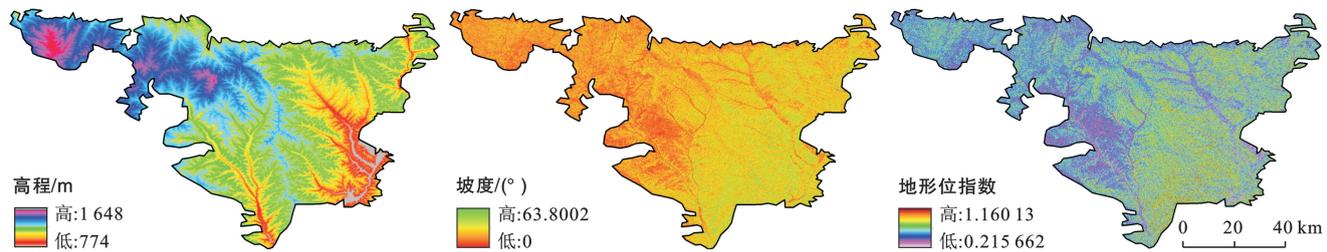


图 1 黄河砒砂岩区高程、坡度及地形位指数

Fig.1 Elevation, slope and topographic position index in arsenic sandstone area of Yellow River basin

表 1 黄河砒砂岩区地形因子分级

Table 1 Grading of topographic factors in arsenic sandstone area of Yellow River basin

等级	高程			坡度			地形位		
	分级/m	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	分级/(°)	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	地形位指数	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
1	<1 000	911.986	5.47	<2	4 306.992	25.85	0.21~0.37	796.182	4.78
2	1 000~1 100	1 641.380	9.85	2~5	4 789.041	28.75	0.37~0.53	6 047.700	36.30
3	1 100~1 200	3 590.448	21.55	5~15	4 017.681	24.12	0.53~0.69	6 683.540	40.12
4	1 200~1 300	4 601.531	27.62	15~25	2 056.436	12.34	0.69~0.85	2 792.669	16.76
5	1 300~1 400	3 291.341	19.76	25~35	1 187.450	7.13	0.85~1.01	335.694	2.01
6	>1 400	2 623.443	15.75	>35	302.528	1.82	1.01~1.17	4.343	0.03

### 2.2 地形位指数

地形位是高程、坡度等因素共同作用组成的综合指数<sup>[25]</sup>,集成高程、坡度等多元化地形要素,多维视角审视土地利用的空间配置及其随时间的变化趋势,用以定量分析土地利用变化的空间格局随综合地形要素梯度变化的规律,其计算公式为:

$$T = \ln \left[ \left( \frac{E}{e} + 1 \right) \cdot \left( \frac{S}{s} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中: $T$  被定义为地形位指数; $E, e$  分别表示某一点的高程和该点所处区域平均高程; $S, s$  分别为某一点的坡度和该点区域内的平均坡度。高程和坡度增加,对应的地形位指数随之增高;高程坡度小则对应

较小的地形位指数;高程高而坡度小或者高程低而坡度大的地形位指数倾向于处于中等水平。

### 2.3 地形梯度效应

地形分布指数融合了高程与坡度两大关键地形因子,能较好地描述研究区地类沿各种地形梯度的分布情况,它能有效地消除量纲带来的影响,体现出不同土地类型分布的优势<sup>[26]</sup>,其计算公式为:

$$P = \frac{S_{ij}/S_i}{S_j/S} \quad (2)$$

式中: $P$ 为地形分布指数; $j$ 为某地形因子; $S_{ij}$ 为在 $j$ 地形因子某等级下第 $i$ 种地类的地形区面积; $S_j$ 为 $j$ 地形因子下某等级的研究区面积; $S_i$ 为研究区 $i$ 地类面积; $S$ 为研究区的总面积。 $p=1$ 时,说明该土地利用类型在这一级地形区的比重和该地类占整个研究区的比重相一致; $p<1$ 时在某级别地形区上该地类呈劣势分布, $P$ 越小,其分布越劣势; $p>1$ 时,说明在这一级地形区内该地类的分布占优,且 $P$ 越大,则其分布越占优。

### 2.4 土地利用程度综合指数

土地利用综合指数可定量表述土地利用程度在不同级别地形下的分布情况<sup>[27]</sup>,计算公式为:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \cdot C_i \quad (3)$$

式中: $L$ 为土地利用程度综合指数; $n$ 为地类数; $C_i$

为 $i$ 类土地利用类型的面积与总面积之比; $A_i$ 为 $i$ 类土地利用类型的分级指数。

在刘纪元等人<sup>[28]</sup>制定的土地利用分级指数的基础上,依据人类对土地的利用强度将土地利用程度划分为4个等级并分级赋值:未利用地赋值为1,表示其较低的利用价值;草地、水域和林地赋值为2,反映它们相对较高的生态价值;耕地因其农业生产的重要性赋值为3,建设用地因其高度的开发程度和经济效益而被赋值为4。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化

3.1.1 土地利用动态变化 如表2所示,黄河砒砂岩区域的土地利用类型以草地与耕地为主,总面积可达90%以上。2000—2023年,耕地减少最显著,减少了1 716.52 km<sup>2</sup>,而草地增加最多,增加了2 163.56 km<sup>2</sup>。相较之下,林地面积增长最为剧烈,上升了10.48 km<sup>2</sup>。水域面积增加5.98 km<sup>2</sup>,增加速度为15.65%。建设用地扩张剧烈,23 a内面积增长60.9倍,增速高达6 090.84%,显示了地区经济发展与人类需求对建设用地的巨大需求。未利用地面积亦呈减少态势,减少了758.89 km<sup>2</sup>,印证了23 a间人类对黄河砒砂岩区的开发与建设历程。

表2 黄河砒砂岩区2000—2023年土地利用变化

Table 2 Land use changes in arsenic sandstone area of Yellow River basin from 2000 to 2023

土地利用类型	2000年		2023年		2000—2023年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	变化量/km <sup>2</sup>	增速
耕地	3 174.78	19.019	1 458.25	8.736	-1 716.53	-54.07
林地	0.17	0.001	10.65	0.064	10.48	6 090.84
草地	12 434.00	74.487	14 597.56	87.447	2 163.56	17.40
水域	38.21	0.229	44.19	0.265	5.98	15.65
建设用地	125.78	0.753	421.18	2.523	295.40	234.86
未利用地	920.02	5.511	161.13	0.965	-758.89	-82.49

3.1.2 土地利用转移图谱 黄河砒砂岩区依据地表土壤覆盖物状况,可分为覆土区、覆沙区、裸露区(剧烈侵蚀)和裸露区(强度侵蚀)4类。砒砂岩区分区界定呈现显著地形梯度效应。黄河砒砂岩区东部海拔较低,坡度较缓,为覆土砒砂岩区,多为草场与耕地。西、北部海拔较高,坡面较陡,为裸露砒砂岩区。由图2可知,黄河砒砂岩区耕地主要集中分布在砒砂岩区东部的覆土、覆沙砒砂岩区。2000—2023年耕地、未利用地和草地转化剧烈。建设用地主要增长源是草地和耕地,林地面积的主要增长来源是耕地与草地。在空间分布上,耕地主要分布于内蒙古南部和陕

西北部的覆土砒砂岩区。草地向耕地的转变多发生在内蒙古水域地区,而未利用土地的转换主要分布在西南部的覆沙砒砂岩区和裸露砒砂岩区(强度侵蚀)。水域转换相对较少,主要发生在覆土砒砂岩区。土地利用类型变化与砒砂岩区土壤侵蚀程度显著相关,裸露砒砂岩区与覆沙砒砂岩区土地利用程度更低。

### 3.2 土地利用变化的高程梯度效应

由图3可知,2000—2023年除了林地外,其余5种土地类型在高程梯度上的优势分布保持相对稳定。①耕地分布主要集中在中低高程梯度,分布指数随高程梯度的上升而逐渐降低,优势分布向低梯度上

扩展。②林地各梯度上面积增长剧烈,高程优势区域是 1 000~1 200 m;其分布指数主要呈现负相关趋势,3~4 梯度略微回升。2000—2023 年林地的分布指数在低梯度减少,中高梯度上升。③高程梯度上草地分布呈现增长趋势,海拔为 1 200 m 以上草地的分布指数大于 1,为优势分布。④水域的优势分布在小于 1 000 m 的高程梯度上。表明水域分布受高程影响严重。23 a 间整体分布指数降低,且第一高程梯度最为显著。⑤建设用地在低梯度上分布面积更多,高程小于 1 200 m 为优势分布。分布优势随高程增高而降低。2023 年建设用地的分布指数在 1 100 m 以下及 1 400 m 以上相较 2000 年上升,1 100~1 400 m 上分布指数下降。⑥未利用地在分布指数整体随高程增加而增加,在 1 300 m 以上处于优势分布,2000—2023 年,未利用地在中低高程梯度上均下降明显,未利用地开发明显。

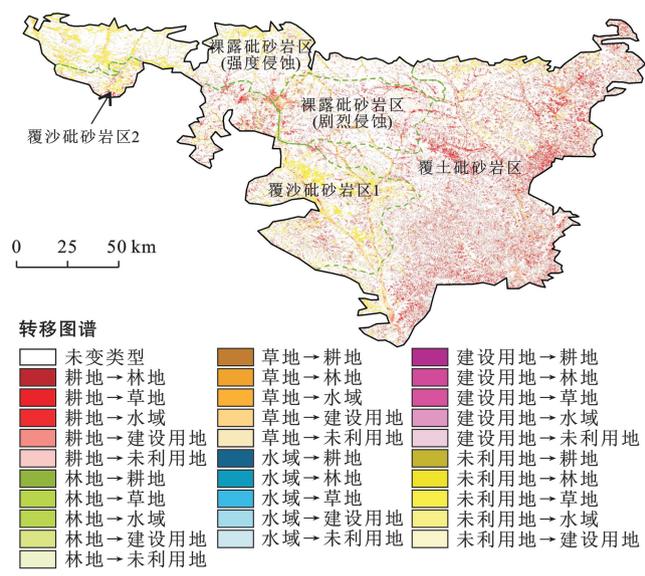


图 2 黄河砒砂岩区 2000—2023 年土地利用转移图谱  
Fig.2 Land use transfer in arsenic sandstone area of Yellow River basin from 2000 to 2023

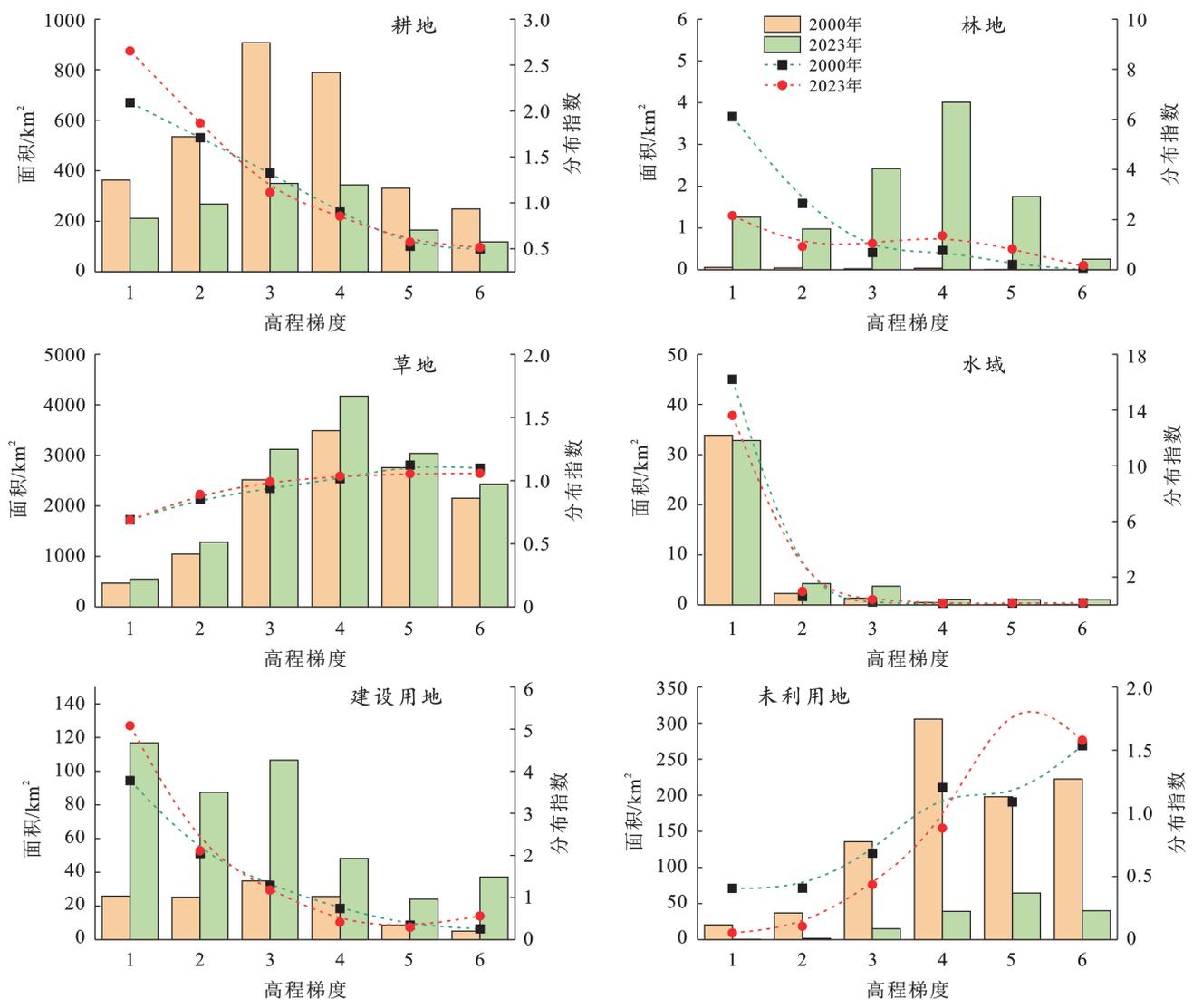


图 3 黄河砒砂岩区各土地利用类型在高程梯度上的分布差异

Fig.3 Distribution differences of each land use type over elevation gradient in arsenic sandstone area of Yellow River basin

### 3.3 土地利用变化的坡度梯度效应

由图 4 可知,耕地、未利用地在低、中坡度梯度上分布比例较高,林地、草地、水域在高坡度梯度上优势分布,建设用地在 23 a 间优势分布从中高坡度梯度转为低中坡度梯度。①2000—2023 年耕地分布指数在  $0^\circ\sim 5^\circ$  坡度梯度上增加, $5^\circ$  以上降低。②林地草地优势分布区域随着坡度梯度升高而增加,高坡度梯度上优势分布。23 a 间,林地是第一坡度梯度上转为优势分布,高坡度梯度上分布指数降低,草地在高梯度上分布指数降低。得益于退耕还林、退耕还草及人工培育的结果,高梯度上单一土地利用类型减少,土地

利用类型趋于完善合理。③水域分布指数随着坡度等级增加先降低,在  $<5^\circ$ 、 $>20^\circ$  的坡度上为优势分布, $5^\circ\sim 25^\circ$  坡度梯度上为劣势分布。23 a 间优势分布变化不显著。④2000 年建设用地在坡度  $>5^\circ$  为优势分布。 $<5^\circ$  劣势分布,2023 年则与之相反,印证建设用地分布主要受人类政策、行为影响,在人为开发、城市化的作用下,建设用地更集中,更扩张。⑤未利用地在坡度  $0^\circ\sim 5^\circ$  为优势分布, $>5^\circ$  为劣势分布,且分布指数随坡度增高而降低。2000—2023 年未利用地在坡度梯度  $<5^\circ$  上分布指数略微下降, $15^\circ\sim 25^\circ$  略微上升,其余各等级上优势分布无明显变化。

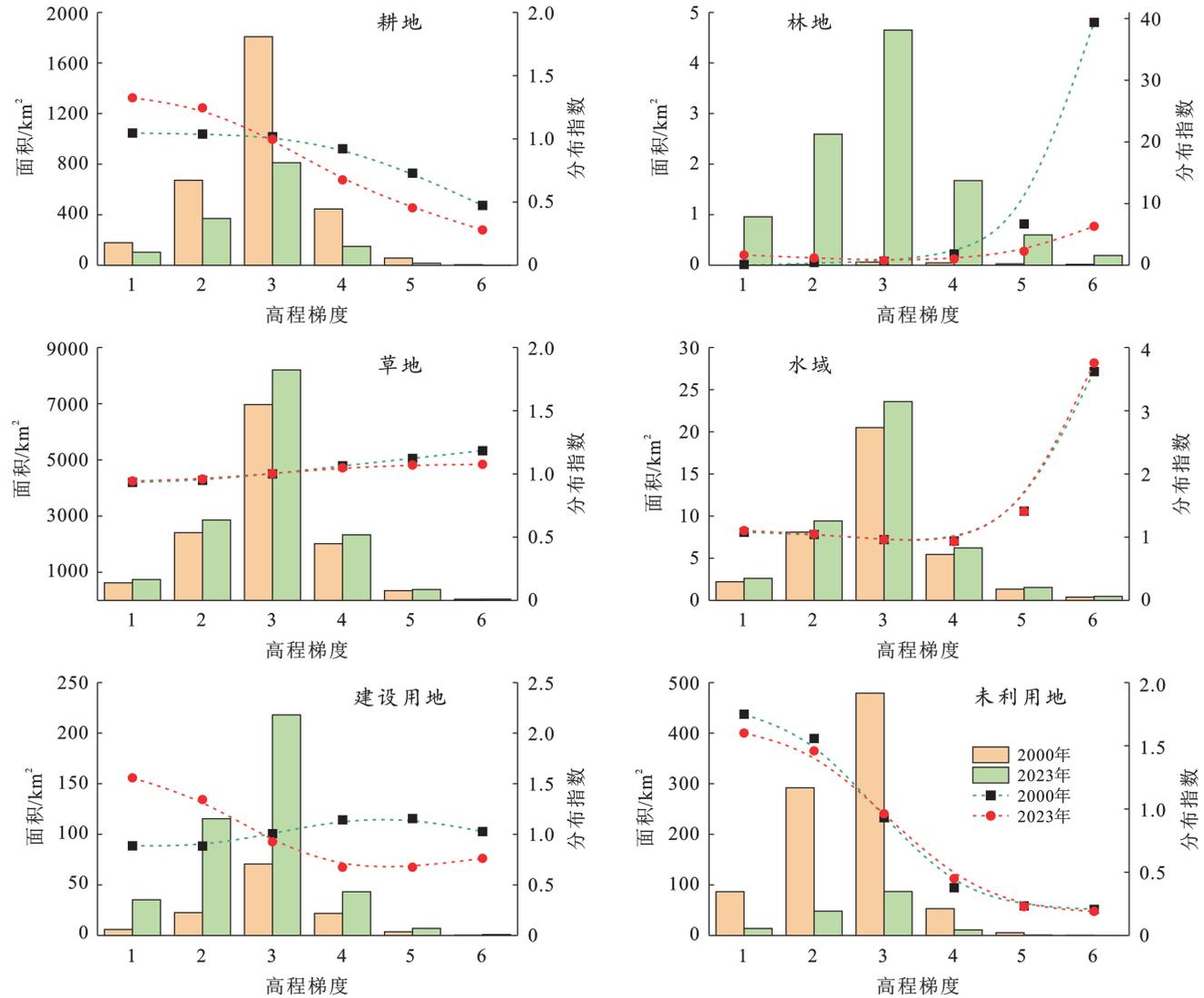


图 4 黄河砒砂岩区各土地利用类型在坡度梯度上的分布差异

Fig.4 Distribution differences for each land use type on slope gradient in arsenic sandstone area of Yellow River basin

### 3.4 土地利用变化的地形位梯度效应

由图 5 可以看出: ①2000—2023 年,耕地分布指数随地形位梯度升高而降低,优势分布于 1,2 级;相较于 2000 年,2023 年耕地分布在第 1,2 级地形位上

明显增多,3~5 级地形位上降低。②2000 年林地在低级地形位梯度上劣势分布,高地形位上优势分布,分布指数随地形位增加而上升,2023 年除了第 3 级地形位上,林地皆为优势分布。2000—2023 年第 5—6 级地形

位分布指数下降。③第在 3—5 级地形位上草地为优势分布,草地的分布指数在地形位梯度上升的过程中,呈现增加趋势。23 a 间 1—3 级地形位梯度上分布变化不大,在高地形位上分布指数降低。④水域的分布在低、中地形位上集中分布,分布优势在低地形位与高地形位上均呈现集中态势。特别在 6 级地形位上占据优势地位,而在中地形位则劣势分布。23 a 间,水域在低地形位的分布指数有所下降,而高地形位有所上升,这一趋势表明水域分布正逐渐倾向

于向高地形位发展。⑤建设用地在 1—2 级地形位上呈现显著的优势分布,而在其他等级地形位上则处于劣势地位。此外,其分布优势随着地形位的升高而逐渐减弱。2000—2023 年,低地形位分布优势上升,高地形位分布优势下降。⑥未利用地优势分布于 1, 2 级地形位; 23 a 间未利用地分布指数在 1—2 级地形位上降低,在 3—6 级地形位上升,6 级地形位上分布指数显著增大,表明低地形位的利用程度增高,存在向高地形位发展的趋势。

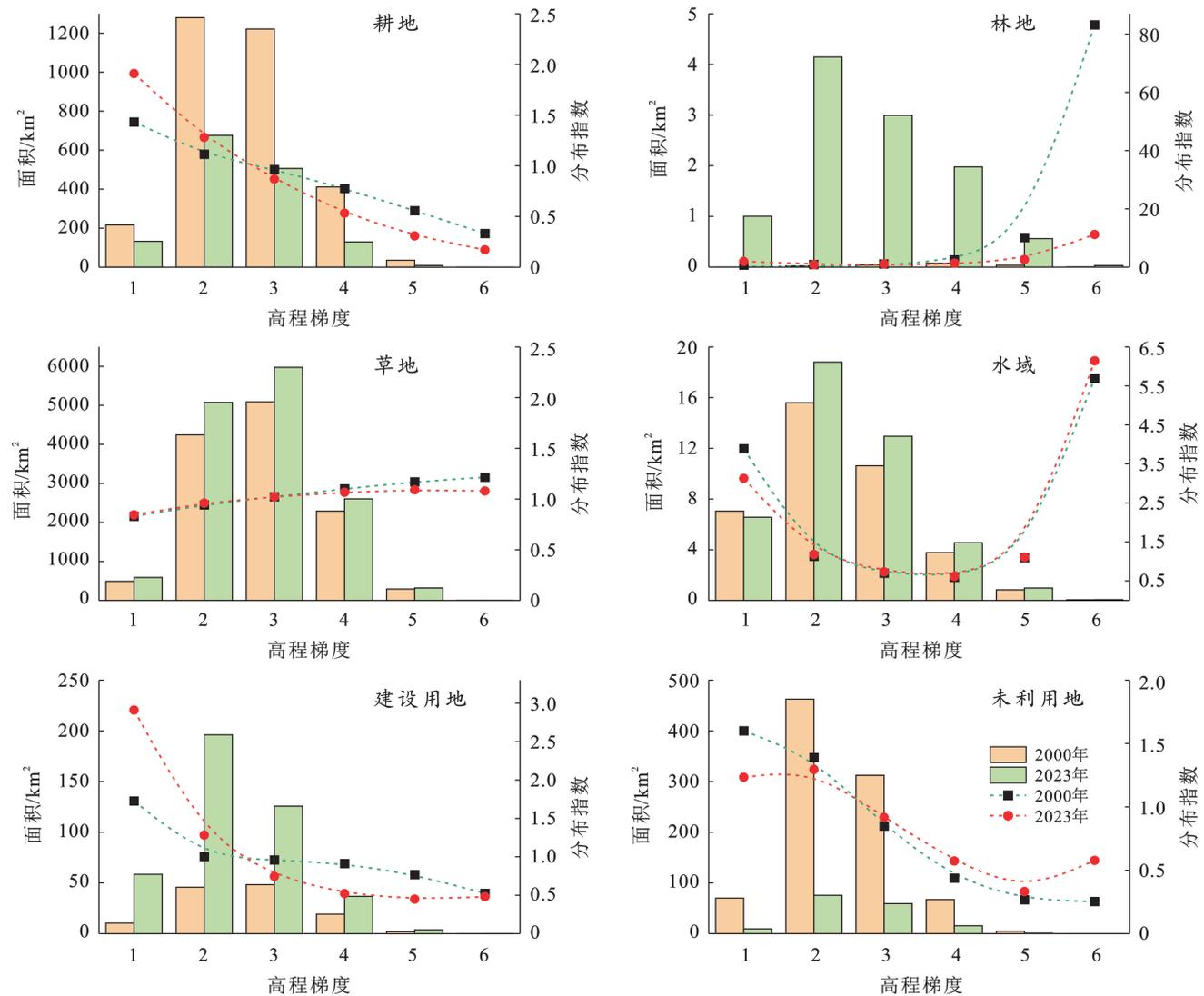


图 5 黄河砒砂岩区各土地利用类型在地形位梯度上的分布差异

Fig.5 Distribution differences for each land use type on topographic gradient in arsenic sandstone area of Yellow River basin

### 3.5 土地利用程度的地形梯度分析

2000—2023 年,随着地形位梯度的增加,黄河砒砂岩区的土地利用程度综合指数呈现降低趋势(图 6)。其主要原因是高地形位区域的海拔相对高、坡度相对大,对应区域开发的较为困难。土地利用程度在地形位级别增高之后下降,表明随着地形位增

高,土地利用的形式趋于单调。2000—2023 年,土地利用程度综合指数在 1, 2 级地形位明显增大, 3—6 级降低,其原因主要为经济发展、环境保护和水土保持治理等人类行为对土地利用形式的影响。23 a 间土地利用程度综合指数变化程度随地形位等级升高而先降低后升高。

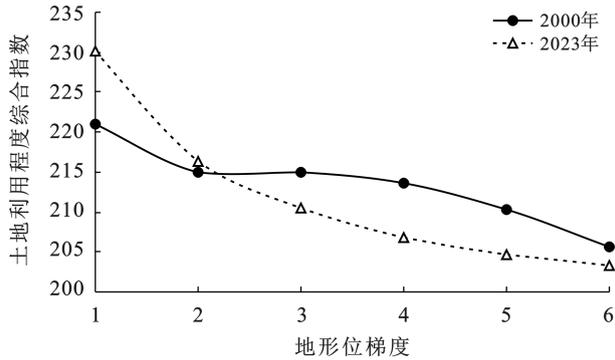


图 6 黄河砒砂岩区 2000—2023 年土地利用程度综合指数  
Fig.6 Composite land-use extent index in arsenic sandstone area of Yellow River basin

使用 ArcGIS 渔网工具分别计算 2000 和 2023 年各地类在 1 km×1 km 栅格中所占比重,绘制土地利

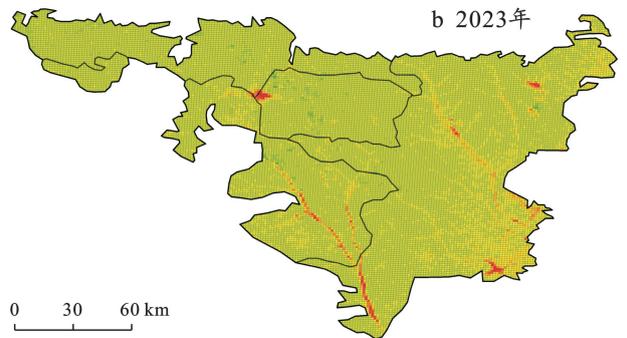
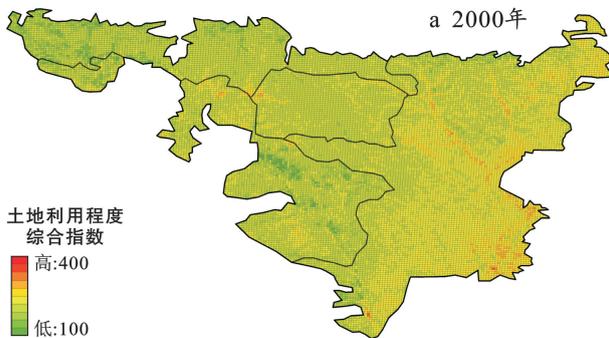


图 7 黄河砒砂岩区 2000—2023 年土地利用程度综合指数分布

Fig.7 Distribution of composite index of land use extent in arsenic sandstone area of Yellow River basin

## 4 结论

(1) 受退耕还林、退耕还草的持续影响,2000—2023 年黄河砒砂岩区林地面积增加最为明显,耕地呈减少趋势。由于该区域未利用地资源的丰富性,加之能源重化工基地建设的推进和城镇化进程加速,草地减少而建设用地大幅增加。

(2) 黄河砒砂岩区土地利用类型在地形梯度上存在明显差别,不同地类对地形的选择性不同。耕地、建设用地、未利用地最大优势区在 0.21~0.37 地形位,优势分布随地形位升高而呈现下降态势,而林地、草地则在 1.01~1.17 高地形位上呈现优势分布。而水域的优势区域则分布在低地形位和高地形位。各梯度上土地利用变化随政策导向、人类活动变化呈现不同态势。

(3) 该区土地利用类型受地形因素的影响较大。2000—2023 年,耕地在海拔 1 200~1 300 m,坡度 25°~35°,地形位指数为 0.85~1.01 的地区减少最多;林地在海拔为 774~1 000 m,坡度>35°,地形位指数为

用程度综合指数图(图 7)。在分区土地侵蚀方面来看,23 a 间土地利用程度均有提升,裸露砒砂岩区(剧烈侵蚀)、覆沙砒砂岩区 1 的土地利用程度增长强烈,而覆沙砒砂岩区 2 的土地利用程度与其他 4 个分区相比增长最小;对比黄河砒砂岩区的土地利用分类图可以发现,在草地与林地密集分布的区域,土地利用综合指数较低。

在建设用地分布的区域土地利用程度综合指数较高。在 1,2 级地形位梯度上,土地利用程度综合指数增长更高,表明黄河砒砂岩地区各地形位等级上土地利用开发趋于更高更合理;随着时间推移,土地利用程度综合指数较高的区域呈现出显著的增加趋势,并且其聚集性亦有所增强,土地利用正向着更为合理化和稳定化的方向发展。

1.01~1.17 区域降低最显著;建设用地在海拔 774~1 000 m,坡度 0°~2°,地形位指数为 0.21~0.37 分布优势增加最多。研究表明该区域土地利用格局变化是人类活动,海拔、坡度等地形因素的共同作用结果。

(4) 受自然环境的制约以及人为活动的共同作用,2000 年土地利用程度综合指数最高为 220.99,最低为 205.69。2023 年土地利用程度综合指数最高为 230.17,最低为 203.36。最高者皆处于 1 级地形位,最低者都处于 6 级地形位。黄河砒砂岩区生态脆弱,水土流失依旧严峻,仍需要根据自然地形、加强退耕还林、还草等政策实施、持续优化布局。

研究土地利用在地形梯度上的时空变化规律,有利于优化土地利用方向,对于确定黄河砒砂岩区小流域水土保持配置模式有重要作用。随着数据精度的提高,今后可在微地形植被精准配置和侵蚀驱动力等方面做进一步研究,从而为建设黄河生态屏障,促进黄河长治久安提供科技支撑。

## 参考文献 (References)

[1] Study on spatial pattern of land-use change in China during

- 1995—2000 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2003 (4):373-384.
- [2] Wang X, Gong W, Huang X, et al. Assessment of eco-environmental quality on land use and land cover changes using remote sensing and GIS: A case study of Miyun county [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2018, 17(3):739-746.
- [3] 李硕,沈占锋,刘克俭,等.大清河流域土地利用变化的地形梯度效应分析[J].*农业工程学报*, 2021, 37(5):275-284.
- Li Shuo, Shen Zhanfeng, Liu Kejian, et al. Analysis of terrain gradient effects of land use change in Daqing River basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(5):275-284.
- [4] 许英杰,杨绍微,张峻铭,等.云南金沙江干热河谷县土地利用景观格局的地形效应[J].*生态学杂志*, 2023, 42(8):1982-1992.
- Xu Yingjie, Yang Shaowei, Zhang Junming, et al. Topographic effect of county-level land-use landscape pattern in the dry-hot valley of Jinsha River, Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(8):1982-1992.
- [5] 周晓艳,何依依,黄欣,等.三峡库区生境质量的地形梯度效应及对土地利用变化的响应[J].*农业工程学报*, 2021, 37(11):259-267.
- Zhou Xiaoyan, He Yiyi, Huang Xin, et al. Topographic gradient effects of habitat quality and its response to land use change in Hubei Section of the Three Gorges Reservoir [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11):259-267.
- [6] 杨斌,王占岐,张红伟,等.高山贫困地区农村居民点空间格局演变特征及驱动机制[J].*农业工程学报*, 2021, 37(4):285-293.
- Yang Bin, Wang Zhanqi, Zhang Hongwei, et al. Spatial pattern evolution characteristics and driving mechanism of rural settlements in high mountain areas with poverty [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(4):285-293.
- [7] Sterling S M, Ducharne A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3:385-390.
- [8] 李益敏,王东驰,袁静,等.基于地形梯度的高山峡谷区土地利用时空格局及功能分区[J].*水土保持通报*, 2020, 40(6):303-311.
- Li Yimin, Wang Dongchi, Yuan Jing, et al. Temporal and spatial pattern and functional zoning of land use in alpine canyon region based on terrain gradient [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6):303-311.
- [9] 佟涛,颜俊君,王亚星,等.秦岭东段洛河流域土地利用变化的地形梯度效应研究[J].*湖南师范大学自然科学学报*, 2024, 47(3):10-18.
- Tong Tao, Yan Junjun, Wang Yaxing, et al. Study on the terrain gradient effect of land use changes in the Luohe River basin of the Eastern Qinling Mountains [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2024, 47(3):10-18.
- [10] 杨李玲,和阳一丹,唐红,等.云南红河流域土地利用变化的地形梯度效应及其功能分区[J].*云南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(2):276-287.
- Yang Liling, He Y, Tang Hong, et al. Terrain gradient effect and functional zoning of land use change in the Red River basin of Yunnan Province [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 46(2):276-287.
- [11] 张帅,韩玲,曹红业.基于 InVEST 模型的渭河流域生境质量评估[J].*兰州大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(2):159-166.
- Zhang Shuai, Han Ling, Cao Hongye. Habitat quality assessment of the Weihe Basin based on the In VEST model [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2024, 60(2):159-166.
- [12] 宦吉林,王铁霖,吴柏清.岷江上游土地利用变化的地形梯度效应分析[J].*人民长江*, 2022, 53(7):63-69.
- Huan Jilin, Wang Tielin, Wu Boqing. Terrain gradient effect analysis of land use change in upper reaches of Minjiang River [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(7):63-69.
- [13] 张静,任志远.秦巴山区土地利用时空格局及地形梯度效应[J].*农业工程学报*, 2016, 32(14):250-257.
- Zhang Jing, Ren Zhiyuan. Spatiotemporal pattern and terrain gradient effect of land use change in Qinling-Bashan mountains [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14):250-257.
- [14] 丁智强,华红莲,王平,等.哈尼梯田遗产核心区土地利用信息图谱及地形梯度效应[J].*农业工程学报*, 2021, 37(23):225-234.
- Ding Zhiqiang, Hua Honglian, Wang Ping, et al. Land use change geo-spectrum and its topographic gradient effect in the core areas of Hani Terraces, a World Heritage Site [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(23):225-234.
- [15] 薛曾辉,高驭洋,卢枰达,等.基于土地利用和地形的生态系统服务空间分布及权衡—协同—独立关系:以安塞区为例[J].*水土保持研究*, 2024, 31(2):240-251.
- Xue Zenghui, Gao Yuyang, Lu Pingda, et al. Spatial distribution and tradeoff-synergy-independence relationships of ecosystem services based on land use and topography: Taking the Ansai district as an example

- [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 240-251.
- [16] 石运杰, 蔡葵, 吴文春, 等. 基于地形特征分异的土地利用分布研究: 以珠穆朗玛峰国家级自然保护区为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 394-400.  
Shi Yunjie, Cai Kui, Wu Wenchun, et al. Research on land use distribution based on topographic differentiation: A case study of Qomolangma National Nature Reserve [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 394-400.
- [17] 张览岳, 毛德华. 洞庭湖生态经济区土地利用变化特征及地形梯度效应[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(3): 80-87.  
Zhang Lanyue, Mao Dehua. Change characteristics and terrain gradient effects of land use in Dongting Lake Ecological Economic Zone [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023, 62(3): 80-87.
- [18] 闫卓冉, 王冬艳, 杨月稳, 等. 基于地形特征的中美黑土区土地利用对比[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1844-1855.  
Yan Zhuoran, Wang Dongyan, Yang Yuewen, et al. Comparison of land use in black soil regions between China and the United States based on terrain characteristics [J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1844-1855.
- [19] 张茜茜, 谢臻, 林小睿, 等. 南方山区耕地林果化时空演变及影响机理[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 317-328.  
Zhang Qianqian, Xie Zhen, Lin Xiaorui, et al. Spatio-temporal evolution and impact mechanisms of cropland conversion to forest or fruit production in southern mountainous regions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4): 317-328.
- [20] 杨祯琦, 麻明友, 田建林. 土地利用景观格局的地形分异及驱动机制研究: 以张家界市永定区为例[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(5): 1226-1238.  
Yang Zhenqi, Ma Mingyou, Tian Jianlin. Terrain differentiation and driving mechanism of land use landscape pattern: Take Yongding district, Zhangjiajie City as an example [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(5): 1226-1238.
- [21] 张攀, 姚文艺, 肖培青, 等. 黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J]. 水利学报, 2022, 53(1): 109-116.  
Zhang Pan, Yao Wenyi, Xiao Peiqing, et al. Interactive superposition effect of multi-dynamic erosion in the Pisha sandstone area of the Yellow River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(1): 109-116.
- [22] 肖培青, 姚文艺, 刘慧. 砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J]. 人民黄河, 2014, 36(10): 92-94.  
Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Liu Hui. Research progress and harnessing method of soil and water loss in Pisha sandstone region [J]. Yellow River, 2014, 36(10): 92-94.
- [23] 乔荣荣, 韩艳, 季树新, 等. 基于地形指数的砒砂岩黄土区土壤侵蚀分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 175-182.  
Qiao Rongrong, Han Yan, Ji Shuxin, et al. Analysis of soil erosion in loess area of sandstone based on terrain index [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 175-182.
- [24] 张丽, 王平, 段霄, 等. 大山包地区土地利用的地形梯度效应与空间结构特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 315-321.  
Zhang Li, Wang Ping, Duan Xiao, et al. Terrain gradient effect and spatial structure characteristics of land use in Dashanbao area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 315-321.
- [25] 翟香, 兰安军, 廖艳梅, 等. 地形梯度对土地利用格局时空特征的影响: 以毕节市为例[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(6): 70-80.  
Zhai Xiang, Lan Anjun, Liao Yanmei, et al. Influence of terrain gradient on the spatio-temporal characteristics of land use pattern: Taking Bijie City as an example [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2022, 45(6): 70-80.
- [26] 张莹, 叶宝鉴, 朱志鹏, 等. 福建省土地利用格局的地形梯度效应分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(11): 96-105.  
Zhang Ying, Ye Baojian, Zhu Zhipeng, et al. Terrain gradient effects of land use pattern in Fujian Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(11): 96-105.
- [27] 郭洪峰, 许月卿, 吴艳芳. 基于地形梯度的土地利用格局与时空变化分析: 以北京市平谷区为例[J]. 经济地理, 2013, 33(1): 160-166.  
Guo Hongfeng, Xu Yueqing, Wu Yanfang. Analysis of the land use spatial pattern and spatio-temporal changes based on terrain gradient: A case study of Pinggu District in Beijing [J]. Economic Geography, 2013, 33(1): 160-166.
- [28] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.  
Liu Jiuyan. Macro Survey and Dynamic Research on Remote Sensing of Resources and Environment in China [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996.