

黔中水利枢纽工程区“三生”空间用地生态环境效应

朱娜¹, 兰安军¹, 范泽孟², 夏照亮¹, 王雨露¹

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 基于 TM/Landsat8 OLI 影像数据和土地利用变化数据, 采用生态环境质量指数和分布指数, 分析了贵州省黔中水利枢纽工程区 2000—2020 年的“三生”空间用地变化和生态环境效应, 以及“三生”空间用地变化和生态环境效应对地形地貌的响应特征。结果表明: 2000—2020 年黔中水利枢纽工程区的“三生”空间用地总体特征为生态用地最多, 生产用地次之, 生活用地最少, 其中生态用地面积先减少后增加, 生产用地面积先减少后增加再减少, 生活用地面积则呈持续增加趋势; 草地生态用地、林地生态用地和农业生产用地三者之间的相互转换高于其他用地类型之间的相互转换, 草地生态用地面积转移最大; 工程区生态环境质量整体呈波动变化, 东部和西部的生态环境质量总体优于中部地区, 其中海拔大于 1 700 m、坡度大于 15° 的区域及东坡和南坡生态环境质量较好, 而低海拔区生态环境质量呈逐渐变好趋势, 非喀斯特区和纯喀斯特区生态环境质量好于亚喀斯特区, 但非喀斯特区和纯喀斯特区生态环境质量呈下降趋势。

关键词: “三生”空间; 生态环境效应; 分布指数; 喀斯特区; 黔中水利枢纽工程

中图分类号: F301.2; X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)04-0015-10

Ecological and environmental effects of production-living-ecological space land use in Qianzhong Water Conservancy Hub Project area//ZHU Na¹, LAN Anjun¹, FAN Zemeng², XIA Zhaoliang¹, WANG Yulu¹ (1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on TM/Landsat8 OLI image data and land use data, the ecological environment quality index and distribution index were used to analyze the production-living-ecological space land use and eco-environment effect in Qianzhong Water Conservancy Hub Project area from 2000 to 2020. The response characteristics of land use change and ecological environment effect to topography and landform were also analyzed. The results show that from 2000 to 2020, the land use in the area has the overall characteristics that the ecological land is the most, followed by production land and living land. The area of ecological land first decreases and then increases. The area of production land has a decrease-increase-decrease trend while the area of living land shows a trend of continuous increase. The conversion among grassland ecological land, forest ecological land and agricultural production land is higher than other types of conversion, and the grassland ecological land area has the highest conversion. The ecological environment quality is fluctuated in the project area. The ecological environment quality in the eastern and western parts of the project area is generally better than that in the central part of the project area. The ecological environment quality in the areas with elevation greater than 1 700 m and slope greater than 15° and the eastern and southern slopes is better, while the ecological environment quality in the low altitude areas is gradually improving. The eco-environmental quality of non-karst and pure karst areas is better than that of sub-karst areas, but the eco-environmental quality of non-karst and pure karst areas shows a declining trend.

Key words: production-living-ecological space; ecological and environmental effect; distribution index; karst region; Qianzhong Water Conservancy Hub Project

土地利用转型是人类活动对区域影响的直接表现形式, 会直接影响生物多样性和水土流失, 从而影

响区域生态环境质量和区域社会经济可持续发展^[1-6], 已成为地理学、生态学等多学科重点关注的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971358)
作者简介: 朱娜(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: 1919131001@qq.com
通信作者: 兰安军(1974—), 男, 副教授, 硕士, 主要从事喀斯特环境遥感研究。E-mail: 493486980@qq.com

热点问题之一^[7-8]。土地利用转型的主要表现形式之一是土地利用主导功能的转型,即生产、生活、生态(“三生”)三大主导功能的转型^[9]。从“三生”空间视角研究土地利用转型及其生态环境效应变化,有利于区域资源的合理开发利用、用地功能合理配置和生态环境保护,实现用地空间功能优化和区域可持续发展目标。

对土地利用转型及其引起的生态环境效应变化的研究取得了丰硕的成果。杨清可等^[10]从“三生”空间用地的角度揭示了生活用地、工矿生产用地对农业生产用地的占用是导致长三角地区生态环境质量恶化的重要原因;龚亚男等^[11]对“三生”空间用地变化分析的结果表明,广东省 1990—2015 年生态环境质量有恶化趋势;韩美等^[12]指出植被覆盖度、微地貌类型、土壤类型是黄河三角洲生态环境质量空间分异的主导因子。国内学者对“三生”空间用地的相关研究多以经济、工业较发达的华北平原和东北平原为主^[13-16],鲜有从“三生”空间用地类型变化视角揭示水利水电工程建设对区域生态环境质量的影响。水利水电工程对区域生态环境质量以及经济发展的影响较大,针对水利水电工程建设影响的研究多集中于水质和效益评价,如对南水北调工程效益评价^[17]、对葡萄牙水库进行天然水域评估^[18]、对阿拉圭水库进行水质评估^[19]等,而生态环境脆弱的喀斯特山区建设的重大水利枢纽工程对区域生态环境效应的影响研究尚有欠缺。

黔中水利枢纽工程是国家重点水利工程,该工程的建设对黔中地区生产、生活以及生态具有重要意义。目前针对黔中水利枢纽工程区的研究包括水资源配置^[20]、土壤含水量反演^[21]、植被覆盖时空变化^[22-23]等。本文以 2000—2020 年 TM/Landsat8 OLI 遥感影像数据和 DEM 数据为基础,分析黔中水利枢纽工程区对“三生”空间用地变化的影响及其生态环境效应,以期为区域生态环境保护、资源合理利用提供参考。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

黔中地区位于贵州省中部,是贵州省政治、经济、文化中心,也是贵州省重要交通枢纽,区内人口密集、耕地集中,区位优势明显。

黔中水利枢纽工程区(104°14'E~107°10'E, 25°28'N~27°6'N)位于乌江流域,水资源十分丰富,总面积约 16 630.27 km²,地势西高东低,其中 79% 为石漠化敏感区,生态环境较脆弱^[24],可利用土地资源有限,开发强度不高^[25]。黔中水利枢纽工程经过贵阳市、安顺市、六盘水市、毕节地区以及黔南布

依族苗族自治州的部分地区,是贵州省首个跨流域和地区的大型长距离调水工程^[20-22],分为灌溉区、供水区和水源区(图 1),具有发电、人畜饮水、县乡供水等综合利用功能。

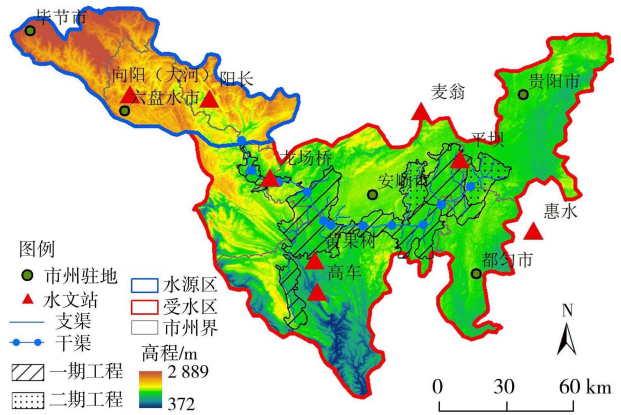


图 1 工程区概况

1.2 研究数据

采用的 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期 TM/Landsat8 OLI 遥感影像数据和 DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m。利用 ENVI5.3 对遥感影像数据进行校正、融合、镶嵌等预处理后,基于喀斯特区特征建立解译标志,依据国家土地利用分类体系获取研究区 5 期土地利用数据,并利用中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)土地利用产品数据(30 m 空间分辨率)进行精度评价,得到 Kappa 系数分别为 83.90%、81.98%、83.43%、86.36% 和 89.16%,分类精度较好,可以满足研究需要。按照土地利用类型主导功能划分“三生”空间用地类型^[8-10],将黔中水利枢纽工程区“三生”空间用地类型数据分为 3 个一级类和 8 个二级类。

高程、坡度及坡向数据利用 ArcGIS10.4 的空间分析功能提取获得。利用贵州省 1:20 万水文地质和岩性图,参考熊康宁等^[26]研究成果,根据岩性类型^[27],将研究区划分为非喀斯特区、亚喀斯特区与纯喀斯特区 3 种地貌类型区域,如图 2 所示。

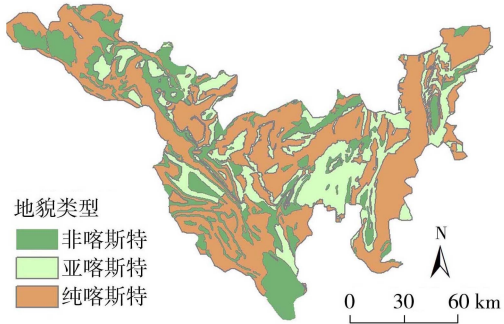


图 2 地貌类型分布

2 研究方法

2.1 “三生”空间用地转移矩阵

采用土地利用转移矩阵对“三生”空间用地类型转换进行描述,反映“三生”空间用地类型在一定时间内的转移方向和转移数量^[28],表达式为

S = [S11 ... S1n; ...; Sni ... Snn] (1)

式中: Sij(i,j=1,2,...,n) 为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年“三生”空间用地类型 i 向“三生”空间用地类型 j 转换的面积;n 为“三生”空间用地类型的数量。

2.2 生态环境质量指数

生态环境质量指数用以描述区域内“三生”空间用地面积的比例,反映区域整体生态环境质量状况^[29-31],其计算公式为

Ii = Σ (Ski / Sk) * wi (2)

式中:Ii为研究区 t 时期内的生态环境质量指数; Ski为第 k 个研究单元内“三生”空间用地类型 i 的面积;Sk为第 k 个研究单元的面积;wi为“三生”空间用地类型 i 的生态环境质量权重。对计算得到的生态环境质量指数采用克里金插值法^[8]进行插值分析,结合研究区生态环境脆弱性特征,将黔中水利枢纽工程区生态环境质量划分为差(Ii ≤ 0.3)、较差(0.3 < Ii ≤ 0.4)、一般(0.4 < Ii ≤ 0.5)、较好(0.5 < Ii ≤ 0.6)和好(Ii > 0.6)5 类。

2.3 生态环境质量的地形分布指数

为明晰“三生”空间用地生态效应的空间分异特征以及对不同地形地貌的响应,采用分布指数 P 计算不同生态环境质量类型在每一地形地貌单元的

分布频率^[32]。P>1 表示某生态环境质量类型在某地形地貌单元内呈优势分布;P<1 表示某生态环境质量类型在某地形地貌单元内呈劣势分布;P=1 表示某生态环境质量类型在某地形地貌单元的分布频率与研究区内该生态环境质量类型的分布频率相当。分布指数计算公式为

P = (Sme / Sm) / (Se / S) (3)

式中:Sme为 e 区域内生态环境质量类型 m 的面积; Sm为研究区生态环境质量类型 m 的总面积;Se为 e 区域的面积;S 为研究区总面积。

3 结果与分析

3.1 “三生”空间用地类型时空变化特征分析

黔中水利枢纽工程区 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期“三生”空间用地类型动态变化如图 3 所示。“三生”空间用地类型以林地生态用地为主,占用地总面积的约 40.58%,其次为农业生产用地和草地生态用地,约分别占用地总面积的 29.41% 和 25.55%,而其他生态用地面积较小,仅占 0.01%。从图 3 可看出,林地生态用地面积变化明显,主要表现为草地生态用地向林地生态用地转变。水域生态用地面积在 2015—2020 年显著扩大,主要原因是黔中水利枢纽一期工程建成,表现为在研究区南部和北部增加两条带状水域生态区。城镇生活用地呈团状式分布在县级政府驻地周围,且呈扩张趋势;农村生活用地面积在 2000—2015 年呈增加趋势,且主要分布在工程区东北部的贵阳市。农业生产用地受城市扩张和黔中水利工程建设的影响表现出减少的趋势,贵阳市中部、安顺市中部以及六盘水市北部工矿生产用地显著增加。

从 2000—2020 年“三生”空间用地类型面积

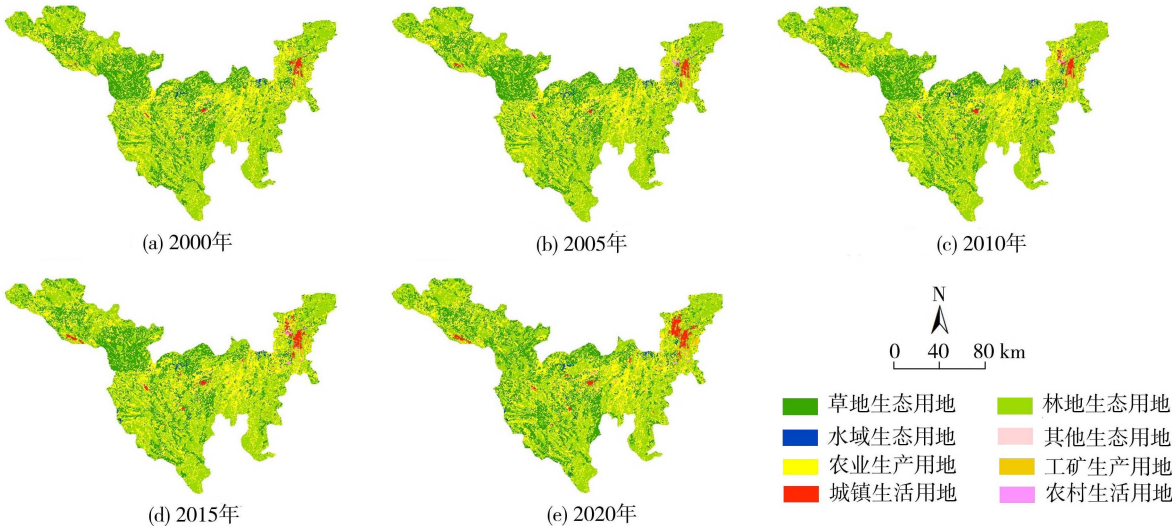


图 3 “三生”空间用地类型

(表1)和“三生”空间用地类型面积变化情况(表2)可以看出,黔中水利枢纽工程区“三生”空间用地面积以生态用地最多,生产用地次之,生活用地最少,黔中水利枢纽工程区草地生态用地、林地生态用地和农业生产用地占比最大。2000—2020年生态用地和生产用地面积分别减少了53.63 km²和117.57 km²,生活用地面积增加了171.32 km²。2000—2015年生态用地面积持续减少,共减少107.43 km²,主要表现为草地生态用地面积减少,尤其2010—2015年生态用地面积减少了87.96%。2015年后生态用地面积开始增加,到2020年共增加53.80 km²,主要表现为草地生态用地和水域生态用地增加。生产用地面积在2000—2010年共减少44.14 km²,主要为农业生产用地减少;2010—2015年呈增加趋势,为工矿生产用地增加;2015年后继续减少,到2020年共减少109.55 km²,依旧表现为农业生产用地减少。生活用地面积在20年内持续增加,且主要为城镇生活用地增加。随着城市化进程的快速发展,黔中水利枢纽工程区内城市建设、交通设施建设以及大力发展旅游业在带动经济发展的同时,也是该区域生活用地扩张、生态用地面积和生产用地面积萎缩的重要原因。

表 1 “三生”空间用地类型面积 单位:km ²									
年份	生态用地				生产用地		生活用地		
	草地	林地	水域	其他	农业	工矿	城镇	农村	
2000	4358.48	6539.24	70.40	2.38	5130.41	56.31	94.54	75.11	
2005	4298.01	6598.69	70.35	1.60	5117.15	52.19	102.82	86.18	
2010	4134.18	6738.62	83.18	1.59	5026.73	79.86	136.46	90.38	
2015	4087.49	6689.88	83.80	1.89	4921.65	257.04	184.43	100.79	
2020	4171.27	6625.63	118.09	1.88	4801.41	267.74	257.14	83.83	

表 2 “三生”空间用地类型面积变化 单位:km ²									
时间	生态用地				生产用地		生活用地		
	草地	林地	水域	其他	农业	工矿	城镇	农村	
2000—2005年	-60.47	59.45	-1.15	-0.78	-13.26	-4.12	8.28	11.07	
2005—2010年	-163.83	139.93	12.83	-0.01	-54.42	27.67	33.64	4.19	
2010—2015年	-46.69	-48.73	0.63	0.30	-141.07	177.19	47.97	10.41	
2015—2020年	83.78	-64.26	34.29	-0.01	-120.25	10.70	72.21	-16.96	
2000—2020年	-187.21	86.39	47.69	-0.50	-329.00	211.43	162.60	8.72	

表 3 “三生”空间用地类型转换趋势 单位:km ²									
2000 年用地类型	2020 年用地类型								总计
	草地生态	林地生态	水域生态	其他生态	农业生产	工矿生产	城镇生活	农村生活	
草地生态		765.60	15.31	0.34	216.25	57.93	27.89	4.28	1087.60
林地生态	637.51		18.93	0.08	250.98	49.15	20.04	5.29	981.98
水域生态	1.85	2.38			3.14	0.15	0.36	0.04	7.92
其他生态	0.16	0.08			0.74				0.98
农业生产	257.89	294.16		0.06		125.61	87.22	21.15	806.66
工矿生产	0.63	1.75	0.05		0.80		19.57	0.03	22.83
城镇生活	0.44	1.87	0.13		0.67	0.22		0.05	3.38
农村生活	1.87	2.48	0.64		5.05	1.20	10.88		22.12
总 计	900.35	1068.32	55.63	0.48	477.63	234.26	165.96	30.84	2933.46

注:表中数据表示某空间用地类型从2000年转移到2020年另一空间用地类型的面积。

3.2 “三生”空间用地类型转换趋势

运用 ArcGIS10.4 空间分析功能,结合式(1)计算出黔中水利枢纽工程区2000—2020年土地利用转移矩阵,进一步分析黔中水利枢纽工程区2000—2020年土地利用变化情况。表3为“三生”空间用地类型转移矩阵表,可以看出,2000—2020年草地生态用地、林地生态用地和农业生产用地三者之间相互转换面积较多,其中草地生态用地向林地生态用地和农业生产用地分别转移765.60 km²和216.25 km²,主要分布在黔中水利枢纽工程区北部和西北部地区;林地生态用地向草地生态用地和农业生产用地分别转移637.51 km²和250.98 km²,在研究区南部和西北部较多;农业生产用地分别向草地生态用地和林地生态用地转移257.89 km²和294.16 km²,除东北部贵阳市外,在研究区其余地方均分布较多。其原因是贵阳市多为城区,农业生产用地分布较少。草地生态用地、工矿生产用地、林地生态用地、农村生活用地、农业生产用地对城镇生活用地的扩张贡献较多,主要发生在六盘水市西北部和南部、安顺市以及贵阳市中部,且分布表现为以各县政府驻地为中心向四周扩散,以贵阳市增加较多。2000年以来,贵州省经济飞速发展,城市面积扩张是必然趋势,尤其是作为省会的贵阳地区,扩张趋势更加显著。工矿生产用地的增加主要来源于草地生态用地、林地生态用地和农业生产用地。受经济发展的影响,生产方式由第一产业向第二、三产业转型,经济优势区工矿生产用地也随之增加。农村生活用地的增加来源主要是草地生态用地、林地生态用地和农业生产用地,主要分布在六盘水市南部、安顺市中部和北部以及贵阳市南部。水域生态用地增加、水域面积增大主要是河流拓宽占用周围的草地、林地、农业生活用地,同时黔中水利枢纽工程建设增加了总干渠1条、桂松干渠1条、支渠25条。

综上,黔中水利枢纽工程区工矿业、城市建设、旅游业的发展以及水利设施建设等都主要是占用生

态用地和农业生产用地,导致生态用地和生产用地向生活用地转型。而黔中水利枢纽工程建设完成后,区域内生态用水、生活用水得到保障,生态用地面积增加,生态农业、生态旅游业的发展将有利于促进区域生态恢复。

3.3 生态环境质量变化趋势及空间分布

根据式(2)计算得出黔中水利枢纽工程区 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年“三生”空间用地的生态环境质量指数分别为 0.444、0.444、0.453、0.448 和 0.467,2000—2020 年生态环境质量指数呈“N”形波动上升。其中,2000—2005 年生态环境质量指数变化不明显;2005—2010 年生态环境质量指数略有上升,表明研究区石漠化治理取得了显著效果,生态环境质量开始变好;2010—2015 年生态环境质量指数由 0.453 下降至 0.448,其主要原因是黔中水利枢纽工程于 2009 年动工,同时区域内大力发展旅游业、修建高速公路等主要占用了生态用地,对生态环境产生了一定的破坏作用;2015—2020 年生态环境质量指数迅速上升至 0.467,是因为黔中水利枢纽工程于 2016 年完成一期工程建设,解决了区域内城镇生活及工业用水、生态环境用水问题,不仅带动了区域经济发展,还促进了区域内生态环境恢复。

采用 1 500 m×1 500 m 网格将研究区 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期土地利用划分为 7 745 个网格单元,利用式(2)计算得到黔中水利枢纽工程区生态环境质量等级空间分布如图 4 所示。工程区 2000 年生态环境质量以一般和较差水平为主,而 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年生态环境质量以一般和较好水平为主,且具有明显的空间异质性。2000 年差和较差水平区域主要分布在

安顺市中部、西南部和贵阳市西南部,好和较好水平区主要分布在毕节市和贵阳市东北部;2000—2020 年研究区东北部贵阳市城区生态环境下降,主要是该时期贵阳城区处于经济快速发展时期,是城市扩张导致的;2000—2005 年研究区北部、南部生态环境质量明显变好,北部从一般和较好水平转变为较好和良好水平,南部从差和较差水平转变为一般和较好水平;2005—2015 年研究区中部生态环境质量有下降的趋势,主要原因是 2009 年黔中水利枢纽工程建设期间生产、生活用地对生态用地的挤占;2015—2020 年工程区北部生态环境质量呈下降趋势,由好和较好水平转变为较好和一般水平,六盘水市,安顺市南部生态环境质量显著变好,其原因主要是 2016 年黔中水利枢纽工程一期工程建设完成,生态用水增加促进了这部分地区生态恢复,尤其是研究区中部地区处于黔中水利枢纽工程受水区,在 2016 年黔中水利枢纽工程一期工程建设完成后,中部地区生态环境质量显著变好。

3.4 生态环境质量类型在地形地貌上的分布特征及时空变化趋势

运用式(3)计算研究区生态环境质量类型在地形地貌(高程、坡度、坡向)上的分布情况,分析研究区生态环境质量与地形的关系。

3.4.1 生态环境质量类型随高程分布特征

随着高程的变化,气流、土壤性质等自然条件以及人类干扰程度等也会有所不同^[33],从图 5 可以看出,生态环境质量较好和较差型各时期的变化趋势一致,但随高程的变化分布趋势相反,较好型由劣势分布变为优势分布,较差型则由优势分布变成劣势分布。生态环境质量一般型和差型各时期随高程变化呈波动式变化,2000—2020 年生态环境质量一般型

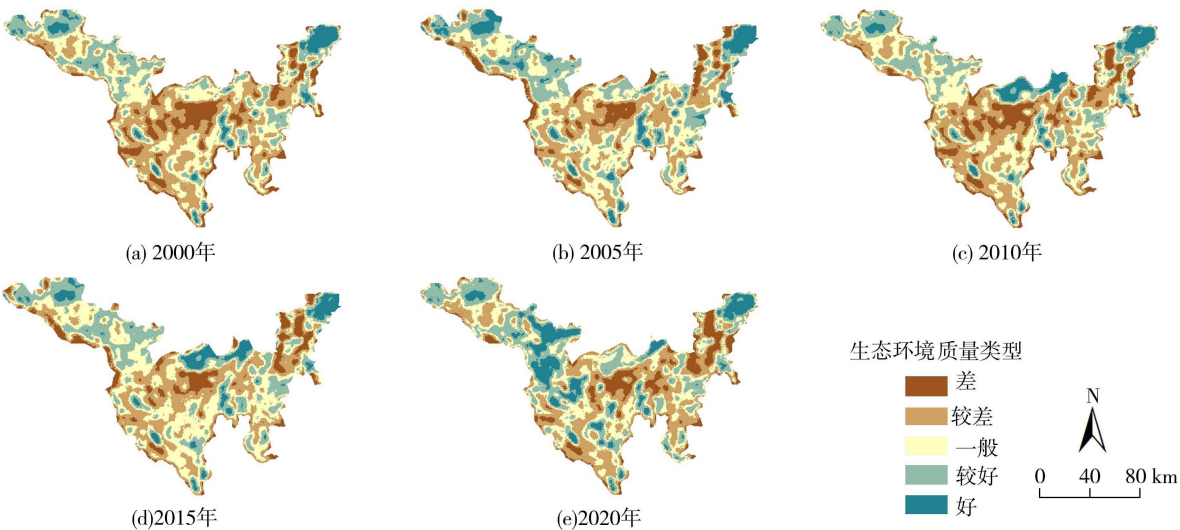


图4 生态环境质量类型空间分布

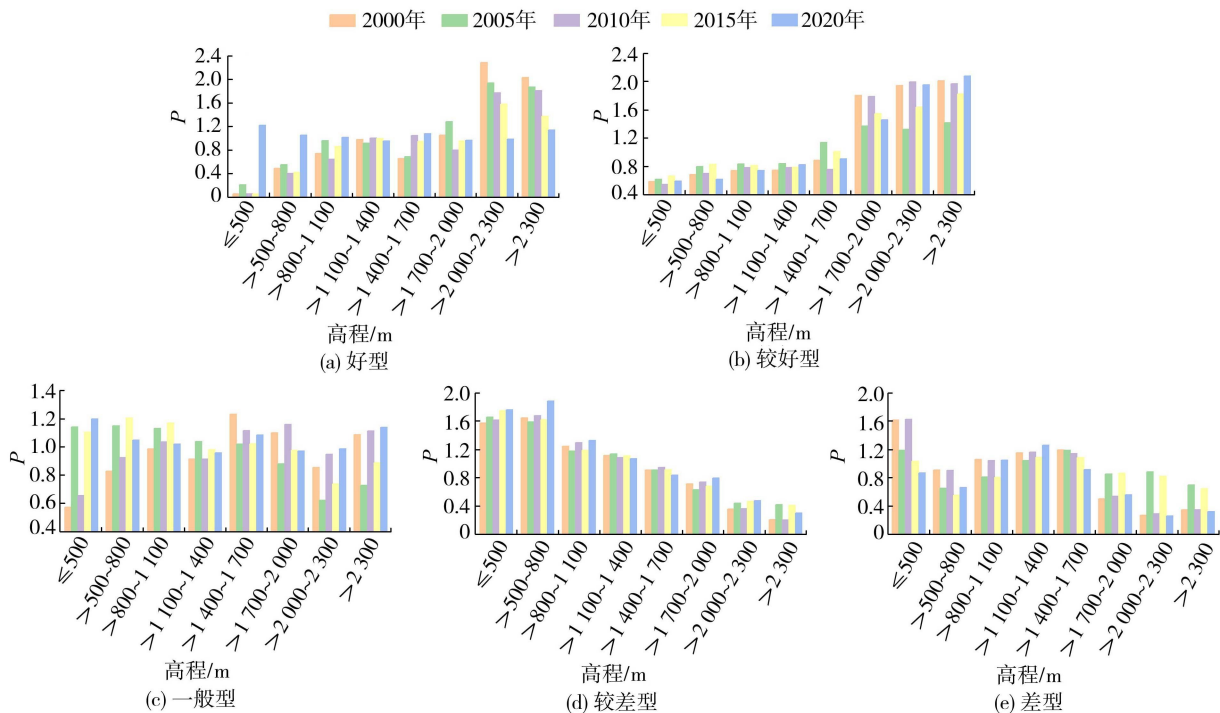


图5 生态环境质量类型随高程的分布

在高程小于1100 m 区域由劣势分布变为优势分布,在1100~1700 m 区域优劣势浮动较大,在1700~2000 m 区域由优势分布变为劣势分布,大于2000 m 后由劣势分布变为优势分布。生态环境质量差型在小于800 m 区域由优势分布逐渐变为劣势分布,在800~1400 m 区域从劣势分布转为优势分布,在大于1400 m 区域由优势分布转变为劣势分布。生态环境质量好型在2000—2015 年以1400 m 和2000 m 为界,在小于1400 m 区域呈优势分布,在1400~2000 m 区域分布趋势在优劣势之间上下浮动,在大于2000 m 区域呈优势分布;在2015—2020 年内随高程的变化生态环境质量好型变化波动较小,在各海拔高度内均呈优势分布。从生态环境质量分布指数随高程变

化的年际特征可以看出,研究区海拔较高的地区生态环境质量优于低海拔区,低海拔区域“三生”空间用地生态环境质量逐渐变好。

3.4.2 生态环境质量类型随坡度分布特征

从图6 可以看出,2000—2020 年黔中水利枢纽工程区各生态环境质量类型分布指数以15°为分界点,生态环境质量好、较好、一般型在坡度小于15°区域内呈劣势分布,大于15°区域表现出优势分布,生态环境质量较差和差型则在小于15°区域内优势分布明显,在大于15°区域呈劣势分布。原因是小于15°区域内人类活动频繁,对“三生”空间用地的影响较大,“三生”空间用地功能不稳定,生态用地易向生活和生产用地转移。

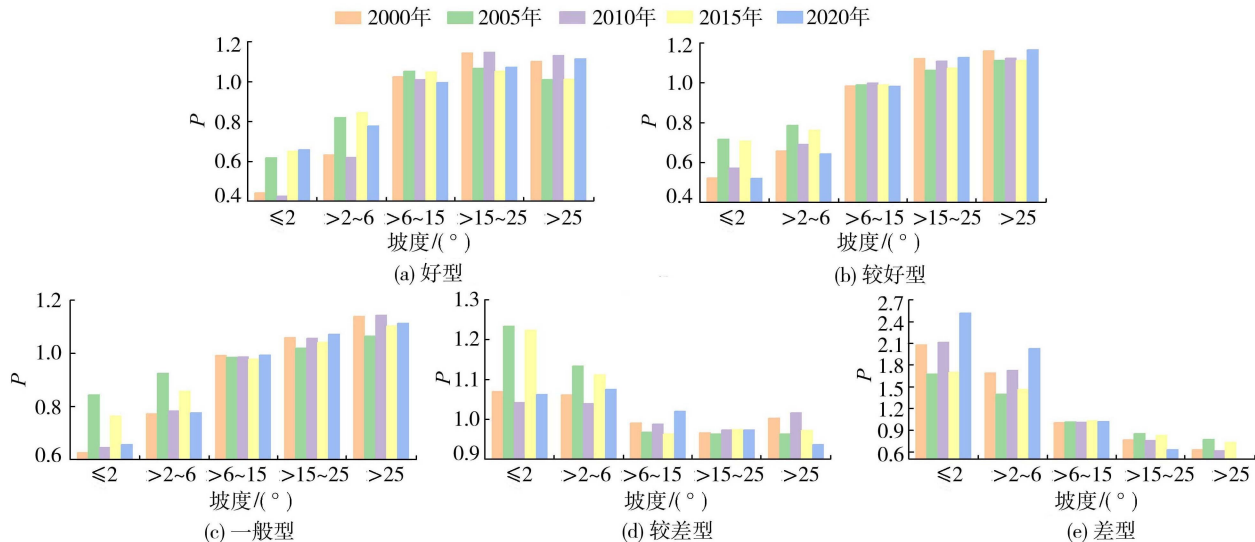


图6 生态环境质量类型随坡度的分布

3.4.3 生态环境质量类型随坡向分布特征

不同坡向的土壤理化性质、太阳辐射量等有所差异,对“三生”空间用地类型也会产生较大影响^[34-35],并进一步影响“三生”空间用地生态环境质量的分布。如图 7 所示,生态环境质量好和较好型均在东坡和南坡表现为优势分布,在平地和西坡为劣势分布,但好型在北坡由劣势分布变成优势分布,较好型则呈劣势分布。生态环境质量一般和较差型在坡向上分布相似,均表现为在南坡和西坡呈优势分布,在平地、东坡和北坡呈劣势分布。生态环境质量差型在平地、西坡和北坡呈显著优势分布,在东坡和南坡呈劣势分布。

3.4.4 生态环境质量类型的地貌分布特征

从图 8 可以看出,2000—2020 年生态环境质量好和较好型在非喀斯特区由优势分布变成劣势分布,在亚喀斯特区和纯喀斯特区一直呈劣势分布。生态环境质量一般型在非喀斯特区和亚喀斯特区一直呈劣势分布,在纯喀斯特区呈优势分布。生态环

境质量较差型在非喀斯特区和亚喀斯特区呈优势分布,在纯喀斯特区呈劣势分布。生态环境质量差型在非喀斯特区呈劣势分布,在亚喀斯特区呈优势分布,而在纯喀斯特区由劣势分布变为优势分布。表明非喀斯特区和纯喀斯特区生态环境质量有下降的趋势,主要原因是非喀斯特区自然条件较好,便于开发利用,导致生态用地易向生活用地和生产用地转移。而纯喀斯特区生态系统脆弱,且破坏后恢复困难。

4 结 论

a. 黔中水利枢纽工程区“三生”空间用地类型中生态用地面积最多,生产用地次之,生活用地最少,其中林地分布较多。“三生”空间用地类型变化趋势为生态用地面积先减少后增加,生产用地面积先减少后增加再减少,生活用地面积则持续增加,但增加速度有所减慢。

b. 2000—2020 年黔中水利枢纽工程区“三生”空间用地类型转化中,草地生态用地、林地生态用地

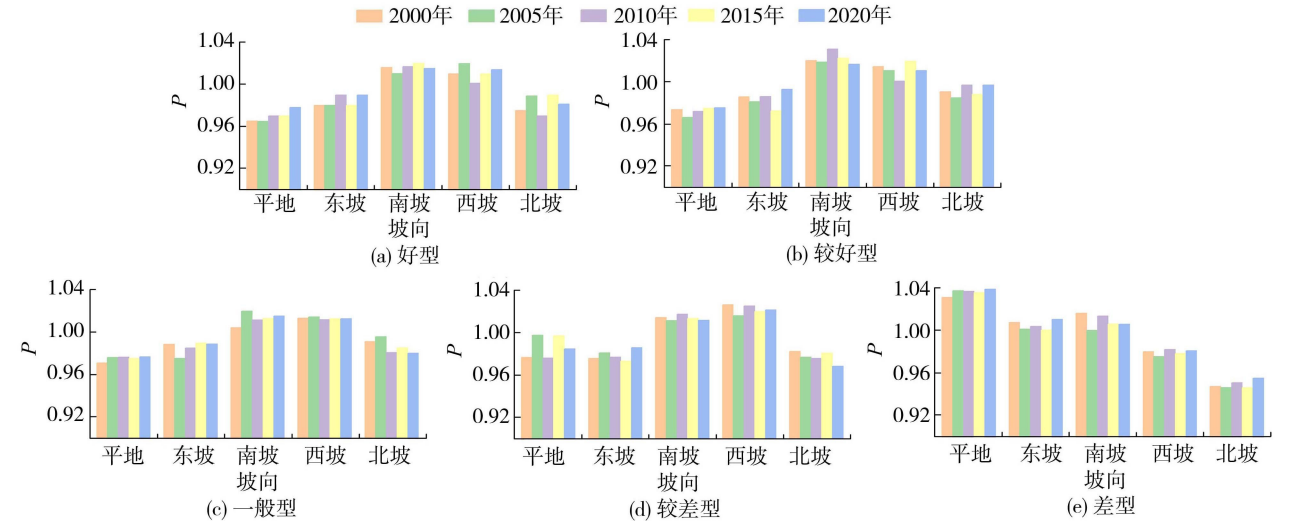


图 7 生态环境质量类型随坡向的分布

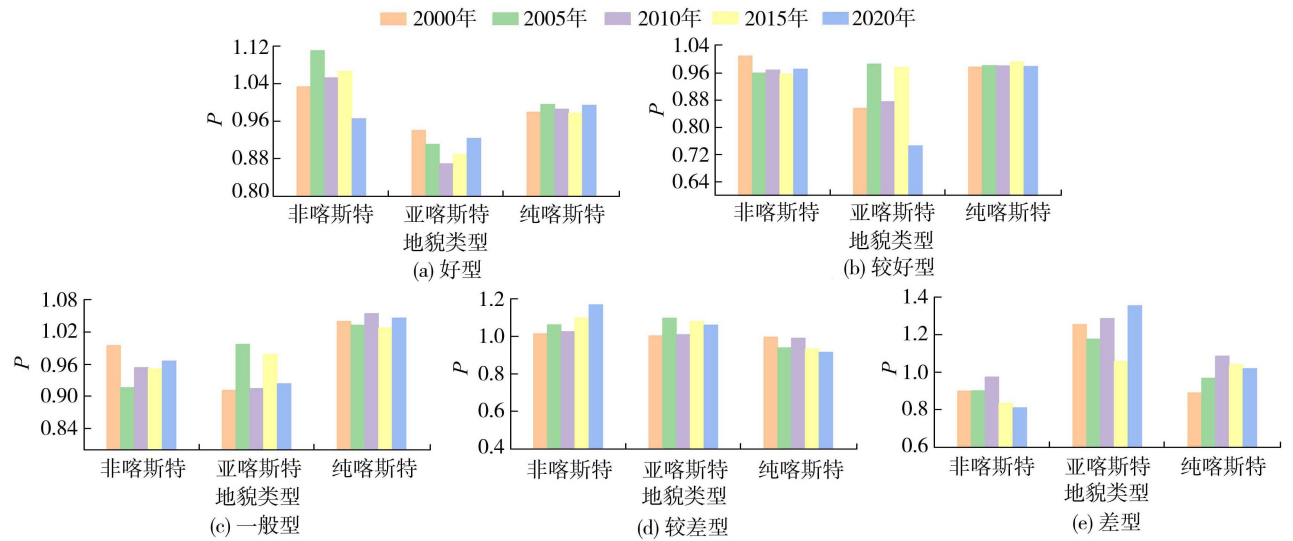


图 8 生态环境质量类型在不同地貌下的分布特征

和农业生产用地三者之间的相互转换强度高于其他用地类型的转换强度,尤其是草地生态用地面积转移最大。工矿业的发展、城市建设等生产、生活功能以及黔中水利枢纽工程的建设等生态功能都主要是占用生态用地和农业生产用地,导致生态用地和生产用地向生活用地转型。

c. 2000—2020 年黔中水利枢纽工程区生态环境质量指数呈“N”形波动上升,表现出先增大后减小再增大的趋势,生态环境质量空间分布异质性明显,整体上东部和西部地区优于中部地区。

d. 高程大于 1 700 m 的区域生态环境质量较好,低海拔区生态环境质量逐渐变好。生态环境质量好、较好以及一般型在坡度大于 15°区域分布优势明显。从坡向看,东坡和南坡生态环境质量较平地、西坡和北坡生态环境质量好。从地貌类型看,非喀斯特区和纯喀斯特区生态环境质量较亚喀斯特区好,但非喀斯特区与纯喀斯特区生态环境质量呈现下降趋势。

参考文献:

[1] 马恩朴,蔡建明,林静,等. 远程耦合视角下的土地利用/覆被变化解释[J]. 地理学报,2019,74(3):421-431. (MA Enpu, CAI Jianming, LIN Jing, et al. Explanation of land use/cover change from the perspective of tele-coupling [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74 (3): 421-431. (in Chinese))

[2] 王珊珊,王金林,周可法,等. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应[J]. 水资源保护,2021,37(2):69-74. (WANG Shanshan, WANG Jinlin, ZHOU Kefa, et al. Response of land-use/land cover change to ecological water conveyance in the lower reach of Tarim River [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 69-74. (in Chinese))

[3] 范泽孟. 基于 SSP-RCP 不同情景的京津冀地区土地覆被变化模拟[J]. 地理学报,2022,77(1):228-244. (FAN Zemeng. Simulation of land cover change in Beijing-Tianjin-Hebei region under different SSP-RCP scenarios [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77 (1): 228-244. (in Chinese))

[4] 游宇驰,李志威,李希来. 1990—2011 年若尔盖高原土地覆盖变化[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):62-69. (YOU Yuchi, LI Zhiwei, LI Xilai. Land cover change in Zoige Plateau during 1990-2011 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (2): 62-69. (in Chinese))

[5] 张洪波,顾磊,孙文博,等. 泾河流域土地利用/覆被变化对径流情势的影响[J]. 水利水电科技进展,2016,36(5):20-27. (ZHANG Hongbo, GU Lei, SUN Wenbo, et al. Influence of land use and land cover changes on runoff regime in Jinghe Basin [J]. Advances in Science and

Technology of Water Resources, 2016, 36 (5): 20-27. (in Chinese))

[6] 李文婷,杨肖丽,任立良. 赣江流域气候和土地利用变化对蓝绿水的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):166-173. (LI Wenting, YANG Xiaoli, REN Liliang. Effects of climate and land use changes on blue and green water in the Ganjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5): 166-173. (in Chinese))

[7] LAMBIN E F, MEYFROIDT P. Land use transitions: socio-ecological feedback versus socio-economic change [J]. Land Use Policy, 2010, 27 (2): 108-118.

[8] CHEN Longgao, YANG Xiaoyan, CHEN Longqian, et al. Impact assessment of land use planning driving forces on environment [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2015, 55: 126-135.

[9] 戴文远,江方奇,黄万里,等. 基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究:以福州新区为例[J]. 自然资源学报,2018,33(12):2098-2109. (DAI Wenyuan, JIANG Fangqi, HUANG Wanli, et al. Study on transition of land use function and ecosystem service value based on the conception of production, living and ecological space: a case study of the Fuzhou New Area [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33 (12): 2098-2109. (in Chinese))

[10] 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 Qingke, DUAN Xuejun, WANG Lei, 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. (in Chinese))

[11] 龚亚男,韩书成,时晓标,等. 广东省“三生空间”用地转型的时空演变及其生态环境效应[J]. 水土保持研究,2020,27(3):203-209. (GONG Yanan, HAN Shucheng, SHI Xiaobiao, et al. Temporal and spatial evolution and associated eco-environment effects of the land use transformation of ecological-production-living spaces in Guangdong Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27 (3): 203-209. (in Chinese))

[12] 韩美,孔祥伦,李云龙,等. 黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制[J]. 地理科学,2021,41(6):1009-1018. (HAN Mei, KONG Xianglun, LI Yunlong, et al. Eco-environmental effects and its spatial heterogeneity of “ecological-production-living” land use transformation in the Yellow River Delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41 (6): 1009-1018. (in Chinese))

[13] 何青泽,谢德体,王三,等. 重庆市北碚区土地利用转型及生态环境效应[J]. 水土保持研究,2019,26(2):290-296. (HE Qingze, XIE Deti, WANG San, et al. Land use transformation and its eco-environmental effects in Beibei

- District, Chongqing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 290-296. (in Chinese))
- [14] 盖兆雪,陈旭菲,杜国明,等. 松花江流域哈尔滨段三生空间演变的生态环境效应及驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 116-123. (GAI Zhaoxue, CHEN Xufei, DU Guoming, et al. Analysis on eco-environmental effects and driving factors of ecological-production-living spatial evolution in Harbin section of Songhua River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 116-123. (in Chinese))
- [15] 赵丽,张贵军,朱永明,等. 基于土地利用转型的土地多功能转变与特征分析:以河北省唐县为例[J]. 中国土地科学, 2017, 31(6): 42-50. (ZHAO Li, ZHANG Guijun, ZHU Yongming, et al. Land multi-functional transformation and characteristic analysis based on land use transition: a case study of Tang County, Hebei Province[J]. China Land Sciences, 2017, 31(6): 42-50. (in Chinese))
- [16] 张蕾,刘格格,魏俊青,等. “三生用地”转型的生态系统服务价值效应:以营口市为例[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 838-846. (ZHANG Lei, LIU Gege, WEI Junqing, et al. The effects of “ecological-production-living” land use transformation on associated ecological service value: a case study of Yingkou City [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 838-846. (in Chinese))
- [17] 杨子桐,黄显峰,方国华,等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 60-66. (YANG Zitong, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Benefit evaluation of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 60-66. (in Chinese))
- [18] RODRIGUES S, PINTO I, MARTINS F, et al. An ecotoxicological approach can complement the assessment of natural waters from Portuguese reservoirs? [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(34): 52147-52161.
- [19] PINTO I, RODRIGUES S, LAGE O M, et al. Assessment of water quality in Aguieira Reservoir: ecotoxicological tools in addition to the *Water Framework Directive* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208: 111583.
- [20] 王永涛,杨璐瑶,张和喜,等. 基于多目标优化的黔中区水资源配置研究[J]. 人民长江, 2017, 48(1): 32-36. (WANG Yongtao, YANG Luyao, ZHANG Hexi, et al. Research on water resources allocation in central Guizhou based on multi-objective optimization [J]. Yangtze River, 2017, 48(1): 32-36. (in Chinese))
- [21] 李永柳,周忠发,蒋翼. 基于 Landsat8 遥感影像的黔中水利枢纽工程区土壤含水量反演分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 78-84. (LI Yongliu, ZHOU Zhongfa, JIANG Yi. Retrieval of soil moisture in the zone of Qianzhong water diversion project based on Landsat8 image data [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 78-84. (in Chinese))
- [22] 李磊,兰安军,钟九生. 黔中水利枢纽工程区植被覆盖变化及其对地形与地貌的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 176-183. (LI Lei, LAN Anjun, ZHONG Jiusheng. Changes in vegetation cover and their response to topography and geomorphology in Qianzhong Water Conservancy Hub Engineering Areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 176-183. (in Chinese))
- [23] 蒋翼,周忠发,黄登红. 黔中水利枢纽区植被覆盖度时空变化及驱动力分析:以平坝为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 221-227. (JIANG Yi, ZHOU Zhongfa, HUANG Denghong. Analysis on spatial-temporal variation and driving factors of fractional vegetation cover in Qianzhong water conservancy area: taking Pingba as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 221-227. (in Chinese))
- [24] 樊云龙,熊康宁,苏孝良,等. 喀斯特高原不同植被演替阶段土壤动物群落特征[J]. 山地学报, 2010, 28(2): 226-233. (FAN Yunlong, XIONG Kangning, SU Xiaoliang, et al. Research on soil fauna community characteristics at different vegetation successions in the karst plateau of Guizhou Province [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(2): 226-233. (in Chinese))
- [25] 李威,赵卫权,苏维词. 基于 GIS 技术的黔中地区人居环境自然适宜性评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1082-1091. (LI Wei, ZHAO Weiquan, SU Weici. Nature suitability evaluation of human settlement environment based on GIS technique in central Guizhou Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1082-1091. (in Chinese))
- [26] 熊康宁,黎平,周忠发,等. 喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究:以贵州省为例[M]. 北京:地质出版社, 2002.
- [27] 马士彬,安裕伦,杨广斌. 基于 GIS 的喀斯特区域不同岩性基底植被 NDVI 变化分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 202-206. (MA Shibin, AN Yulun, YANG Guangbin. Analysis of vegetable NDVI variation on various lithology in karst area based on GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 202-206. (in Chinese))
- [28] 谢叶伟,刘兆刚,赵军,等. 基于 RS 与 GIS 的典型黑土区土地利用变化分析:以海伦市为例[J]. 地理科学, 2010, 30(3): 428-434. (XIE Yewei, LIU Zhaogang, ZHAO Jun, et al. Analysis of landuse dynamic in typical blacksoil region based on GIS and RS: a case study of Hailun County [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(3): 428-434. (in Chinese))
- [29] 冯涛,石培基,张学斌,等. 河谷型城市“三生”空间竞争与生态环境效应:以兰州市为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 229-234. (FENG Tao, SHI Peiji, ZHANG Xuebin, et al. Competition and eco-environmental effect of ecological-production-living spaces in valley city: a case

- study of Lanzhou City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 229-234. (in Chinese))
 - [30] 李晓文,方创琳,黄金川,等. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应:以甘肃河西地区为例[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 280-290. (LI Xiaowen, FANG Chuanglin, HUANG Jinchuan, et al. The urban land use transformations and associated effects on eco-environment in Northwest China arid region: a case study in Hexi Region, Gansu Province [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(3): 280-290. (in Chinese))
 - [31] 路昌,张傲. 东北地区土地利用转型及其生态环境效应[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(4): 123-133. (LU Chang, ZHANG Ao. Land use transformation and its eco-environment effects in Northeast China [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(4): 123-133. (in Chinese))
 - [32] 李云强,齐伟,王丹,等. GIS支持下山区县域农村居民点分布特征研究:以栖霞市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(3): 73-77. (LI Yunqiang, QI Wei, WANG Dan, et al. Research on spatial distribution characteristics of rural settlements in mountainous areas at county level based on GIS: a case study in Qixia City [J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(3): 73-77. (in Chinese))
 - [33] 王莉雯,卫亚星,牛铮. 基于遥感的青海省植被覆盖时空变化定量分析[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1754-1760. (WANG Liwen, WEI Yaxing, NIU Zheng. Analysis of vegetation spatial and temporal variations in Qinghai Province based on remote sensing [J]. Environmental Science, 2008, 29(6): 1754-1760. (in Chinese))
 - [34] 韩先明,左德鹏,李佩君,等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 16-23. (in Chinese))
 - [35] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-06-16 编辑:熊水斌)
- +++++
- (上接第8页)
- [24] 赵一丹,陈红. 虚拟水视角下我国主粮贸易对水资源压力的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(4): 69-73. (ZHAO Yidan, CHEN Hong. Impact of China's staple food trade on water resources pressure from the perspective of virtual water [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(4): 69-73. (in Chinese))
 - [25] MARGAT J, FRENKEN K, FAURÈS J M. Key water resources statistics in Aquastat, FAO's global information system on water and agriculture[R]. Vienna: [s. n], 2005.
 - [26] 封琼,毕忠飞,刘俊. 淮河流域农业水资源压力时空演变及预测分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 27-30. (FENG Qiong, BI Zhongfei, LIU Jun. Time and temporal evolution and prediction analysis of agricultural water resources pressure in Huaihe river basin [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(11): 27-30. (in Chinese))
 - [27] 鲁仕宝,尚毅梓,王浩. 基于修正水资源压力指数的华东地区水-能-粮协同安全评估[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(2): 68-77. (LU Shibao, SHANG Yizi, WANG Hao. Assessment on water-energy-grain collaborative security in east China based on modified water resource pressure index [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(2): 68-77. (in Chinese))
 - [28] 范星,陈彬. 三江平原粮食作物生产水足迹时空特征及影响因素分析[J]. 生态学报, 2022, 42(15): 1-13. (FAN Xing, CHEN Bin. Spatio-temporal patterns and influencing factors of the water footprint of grain crop production in the Sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 1-13. (in Chinese))
 - [29] 谢高地,曹淑艳,罗志海,等. 中国生态足迹报告[R]. 北京:世界自然基金会, 2010.
 - [30] UNSD. Standard country or area codes for statistical use [S/OL]. [2022-06-01]. <https://unstats.un.org/unsd/methodology/m49/>. htm.
 - [31] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption [R]. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE, 2011.
 - [32] MALPASSD. Word bank open data [DB/OL]. [2022-05-30]. <https://data.worldbank.org.cn>.
 - [33] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2022.
 - [34] 郑宇. 开放还是保护:国家如何应对经济危机? [J]. 世界经济与政治, 2018(12): 134-155, 160. (ZHENG Yu. Liberalization or protection; how do states respond to the global financial crisis? [J]. World Economics and Politics, 2018(12): 134-155, 160. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-10-15 编辑:骆超)