

DOI: 10.12401/j.nwg.2023083

南水北调中线工程丹江源地区生态地质格局动态演变

王颖维^{1,2}, 张亚峰^{1,2,*}, 钱信禹^{1,2}, 杨运军^{1,2}, 崔继岗^{1,2}, 游军^{1,2}, 边小卫^{1,3}

(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068;
3. 陕西省地质科技中心, 陕西 西安 710054)

摘要:以南水北调中线工程水源涵养区丹江源地区为研究区,采用坡面调查方法,梳理不同地质建造上的典型生态关键带生态地质特征,利用 ENVI 5.3、ArcGIS 10.2 及 Fragstats4.2 软件,解译分析区内 2000、2010、2020 年 3 期土地利用时空演变和景观格局演变特征。结果表明:①受构造地质背景影响,各地质建造垂向上形成不同的地形地貌、成土母质、土壤类型、水文类型,在以上立地条件的综合影响下形成了不同的生态地质格局。②区内林地比例占绝对优势,林地和耕地占比 85% 以上,其他土地类型比例偏低。2000~2020 年土地利用类型变化显著,水域、耕地和建设用地面积变化较为剧烈。区内自然景观和人造景观之间转入转出频繁,但整体土地利用变化对生态环境扰动较少。林地和耕地将长期是水源地主要的土地利用类型,直接影响着其生态环境效应。③丹江源地区 2000~2020 年景观空间格局变化明显,尤其在 2010~2020 年景观生态过程较活跃。区内各斑块类型趋于规则呈均衡趋势分布,斑块类型间形成了良好的连接性,景观聚集程度逐渐提升,空间分布趋向集中。④南水北调中线工程建设进一步保障了研究区林地基数和水域面积的稳定增长,丹江源地区的生态趋势向好;调水工程及城市化进程建设及保护水源地的移民搬迁导致区内建设用地大幅度增加,存在草地退化和耕地减少现象。建议合理配置土地资源,优化土地利用结构,加强林地和耕地保护及生态补偿,将有利于丹江源地区社会经济和生态环境的可持续发展。

关键词:水源涵养区;丹江源地区;生态地质;土地利用变化;景观格局

中图分类号: P66; X826

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0129-12

Dynamic Evolution of Eco-geological Pattern: Taking Danjiangyuan Area of Central Line Project of South-to-North Water Diversion

WANG Yingwei^{1,2}, ZHANG Yafeng^{1,2,*}, QIAN Xinyu^{1,2}, YANG Yunjun^{1,2}, CUI Jigang^{1,2}, YOU Jun^{1,2}, BIAN Xiaowei^{1,3}

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Geological Science and Technology Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Taking Danjiangyuan area of central line project of south-to-north water diversion as the research area, the eco-geological characteristics of typical eco-critical zones in different geological formation were combed by slope survey. This paper extracts remote sensing data from 2000 to 2020 to interpret land use types

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-04-28; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-292), 陕西省科协青年人才托举计划项目(NYHB202208), 陕西省重点研发计划项目(2021SF2-03), 陕西省公益性项目(202302、202002、202003)联合资助。

作者简介: 王颖维(1991-), 女, 博士, 工程师, 主要从事地质学和生态地质调查研究。E-mail: wyw474338750@163.com。

* 通讯作者: 张亚峰(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质和生态地质调查研究工作。E-mail: aimom84@163.com。

and analyze the spatial and temporal evolution of land use and the evolution characteristics of landscape pattern with the help of ENVI 5.3, ArcGIS 10.2 and Fragstats4.2 software. The results show that each geological formation forms different landforms, soil parent material, soil types and hydrological types in vertical influenced by the structural geology setting. Different eco-geological patterns have been formed under the comprehensive influence of the above site conditions. The proportion of forest land is absolutely dominant, with forest land and arable land accounting for more than 85%, while the proportion of other land types is low. The types of land use changed significantly from the year of 2000 to 2020. Water area, cultivated land and construction land have changed dramatically. There are frequent transfers between natural landscapes and artificial landscapes in the area, and land use changes have less disturbance to the ecological environment. Forest and cultivated land are the main land use types of water source land for a long time, which directly affect their ecological and environmental effects. From 2000 to 2020, the landscape spatial pattern changed significantly, especially from 2010 to 2020, the landscape ecological process was more active. The patch types in the area tend to be distributed regularly and in a balanced trend, with good connectivity between patch types, the degree of landscape aggregation gradually increases, and the spatial distribution tends to be concentrated. The construction of central line project of south-to-north water diversion has further guaranteed the stable growth of the forest land base and water area in the study area, and the ecological trend in Danjiangyuan area is improving. Water transfer projects, urbanization construction and resettlement of protected water source areas have resulted in a substantial increase in construction land in the area, with grassland degradation and arable land reduction. It is suggested that rational allocation of land resources, optimization of land use structure, strengthening of forest land and cultivated land protection and ecological compensation will be conducive to the sustainable development of social economy and ecological environment in Danjiangyuan area.

Keywords: water conservation area; Danjiangyuan area; eco-geology; land use change; landscape pattern

中国生态地质调查起步于20世纪80年代,近年来国内学者在相关研究方面成果丰硕(王尧等, 2019; 张茂省等, 2019; 王京彬等, 2020; 聂洪峰等, 2021; 李文明等, 2022)。南水北调中线工程是中国重要的跨流域调水工程,陕西省商洛市丹江源地区是南水北调中线工程重要水源涵养区(图1a),因地处秦岭保护区,又是全国生态环境建设重点试点示范区,具有重要的生态功能地位。同时,土地利用/覆被变化是导致生态格局演变和生态系统变化的重要因素(Veldkamp et al., 2004; 岳德鹏等, 2007; 陈利顶等, 2008, 2013),景观指数可以体现景观结构组成和空间配置等特征,能高度浓缩景观格局信息,定量获取要素的空间分布特征,为生态格局动态变化研究提供基础信息(Robert, 1997; 邬建国, 2000; Moser et al., 2002; 陈文波等, 2002; 王天山等, 2016)。张雁等(2016, 2018)对商洛市水源区土地利用类型结构及生态环境效应进行分析,但多侧重于水生态评价研究。李文明等(2022)梳理了西北地区的生态地质调查进展并分析了生态安全屏障区存在的问题,尚未对研究区生态地质格局进行过深入调

查。因此,摸清丹江源地区的生态地质本底,分析生态格局动态演变,以及科学合理利用配置土地资源意义重大。笔者依托丹江源地区生态地质调查项目,采用坡面调查方法,梳理不同地质建造上的典型生态关键带生态地质特征,利用ENVI 5.3、ArcGIS 10.2及Fragstats4.2软件,解译分析区内2000~2020年3期土地利用时空演变和景观格局演变特征,掌握全区地下—地表生态地质格局动态演变,为丹江源地区的生态地质环境治理、土地利用结构优化、生态系统保护及生态质量评价提供重要的数据支撑和科学依据,对充分发挥其生态服务功能具有重要现实意义。

1 生态地质背景

按照流域划分原则,在ArcGIS 10.2软件支持下,界定商洛市商州区内丹江及支流的流域面积为1757 km²(图1a)。研究区地形总体呈西北高、东南低,海拔为699~1684 m,主要有中山区、低山丘陵区、河谷川塬区3种地貌单元,具有暖温带南缘过渡带季风性、

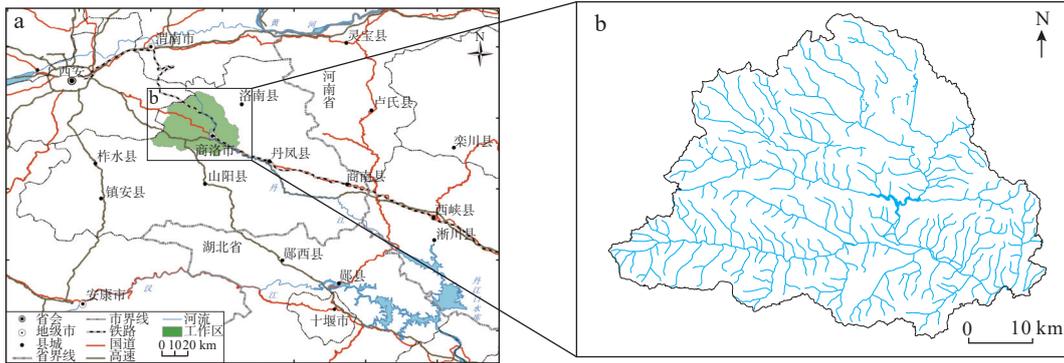


图 1 研究区地理位置(a)及丹江源地区水系分布图(b)

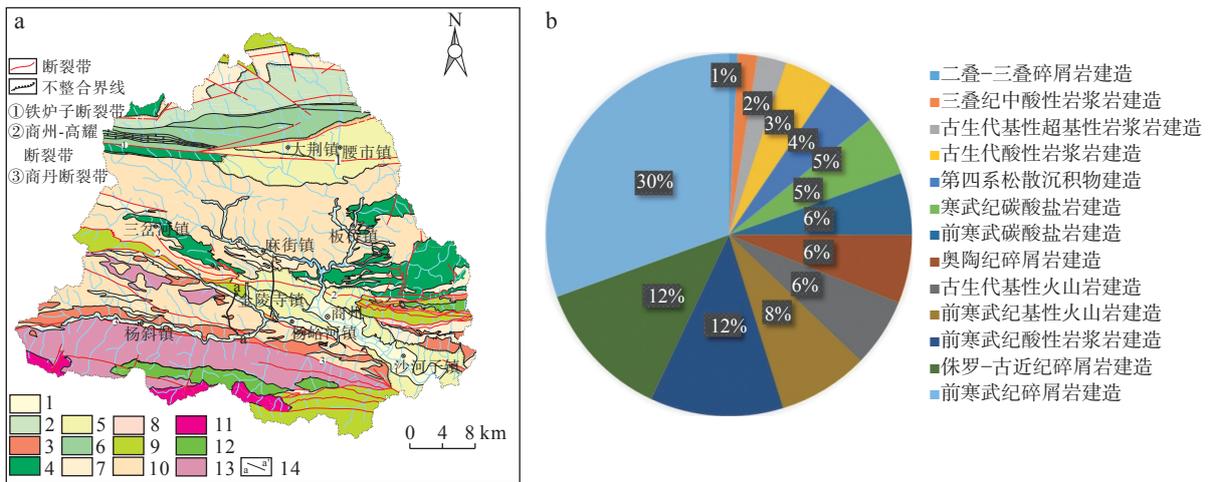
Fig. 1 (a) Geographical location of the study area and (b) drainage distribution map of Danjiangyuan Area

半湿润性山地气候特点。区内多年平均降水量为 699.44 mm, 年际间降水量分布不均, 受地形地貌影响, 区域降水呈西多东少, 南多北少的地域特征, 总体表现为山地多, 河谷阶地少。山区年均降雨量 800 mm 以上, 年均气温为 10~11 °C, 河谷川塬区年均降雨量在 730 mm 以下, 年均气温在 13 °C 以上(国家气象科学数据中心, 1951~2020)。降水量随着高度增加而增多, 表现为降水量的垂直差异性。区内水系发育, 河网密度 0.69~1.28 km/km²(图 1b), 多年平均年径流深为 230 mm, 年径流量为 4.48×10⁸ m³, 平均流量为 8 m³/s, 径流年内分配不均匀。

研究区大地构造位置属华北板块, 以商丹断裂为界, 划分为华北陆块和商丹地壳对接带 2 个二级构造单元(图 2)。基于时代+物质组成的划分方案, 将区内

地质建造划分为 13 类(图 2a), 前寒武纪砂泥质碎屑岩建造、侏罗纪—古近纪陆相砂泥质碎屑岩建造、前寒武纪酸性岩浆岩建造、寒武纪—奥陶纪海相碳酸盐岩建造等为主(图 2b)。研究区内岩浆岩较发育, 火山岩岩性为变玄武岩、变安山岩、凝灰岩等。侵入岩主要有新元古代混合片麻岩、志留纪辉长岩体等, 另有少量三叠纪、侏罗纪花岗岩体。

区内土壤类型有黄棕壤、紫色土、褐土、潮土、粗骨土和新积土(潘贤章等, 2015)。丹江源地区植被空间分布明显, 丹江源地区用材林和主要水源涵养林区主要分布在中山区(陕西省商洛地区地理志, 1981); 土壤较瘠薄的低山区主要分布有常绿阔叶树的落叶林带、栓皮栎林带、经济林、用材林和草场草坡; 低山丘陵区森林覆盖率较低, 以天然草地、人工林为主。



1.第四纪陆相松散堆积建造; 2.寒武纪海相碳酸盐岩建造; 3.古生代酸性岩浆岩建造; 4.寒武纪基性火山岩建造; 5.侏罗纪-古近纪陆相砂泥质碎屑岩建造; 6.奥陶纪泥质碎屑岩建造; 7.前寒武纪碳酸盐岩建造; 8.三叠纪陆相砂泥质碎屑岩建造; 9.古生代基性火山岩建造; 10.前寒武纪砂泥质碎屑岩建造; 11.三叠纪酸性岩浆岩建造; 12.古生代基性-超基性岩浆岩建造; 13.前寒武纪酸性岩浆岩建造; 14.实测剖面

图 2 丹江源地区地质建造图(a)及不同地质建造面积分布图(b)

Fig. 2 (a) Geological construction map and (b) distribution map of different geological construction areas in Danjiangyuan area

区内产业结构以农业、林业为主导产业,经济基础较为薄弱。

2 研究方法

2.1 生态地质剖面与生态关键带解析

在初步查明生态地质背景的基础上,结合微地貌的影响因素,采用野外路线调查结合坡面调查的方法(王京彬等, 2020; 聂洪峰等, 2021),选取代表性的地段开展生态地质剖面测量解析,控制重要的生态地质类型,结合浅钻及垂向剖面等形式予以揭露,观察、测量生态地质现象,记录不同地质、地形地貌、生态、土壤等生态地质信息,绘制生态地质剖面,梳理区域生态地质条件现状及制约因素,垂向上查明不同地质建造上的典型生态关键带相关生态要素间的相互作用过程。

2.2 遥感解译

文中遥感影像数据选择 2000 年 Landsat TM5, 2010 年 Landsat TM5, 2020 年 Landsat OLI 影像,时相以 9~10 月为主,分辨率为 30 m,云量均 3% 以下,使

用的数字高程模型下载自地理空间数据云官网(中国科学院计算机网络信息中心科学数据中心, <http://www.gscloud.cn>)。运用 ENVI 5.3 对 3 期遥感航片进行解译。结合商州区土地利用现状,对研究区土地利用类型进行划分,并与 GLOBELLAND30 数据(Zhu et al., 2010; Chen et al., 2011, 2014, 2016)进行比对,准确率达到 84.6% 以上,解译结果符合精度要求,在 ArcGIS 10.2 软件支持下,绘制 3 期土地利用分类图,分析区域土地利用时空演变。

2.3 景观格局分析及指数选取

结合研究实际需求,笔者参考前人研究成果的基础上(李煜东等, 2020; 张晓宁等, 2020; 苏明伟等, 2021; 张建等, 2021; 张林等, 2022),选取相关景观格局指数进行计算(表 1),主要从斑块类型和景观水平层次开展研究。利用 ArcGIS 10.2 的空间分析模块将土地利用类型图转换为 Grid 格式后,采用目前广泛使用的景观格局计算分析软件 Frastats 4.2 进行丹江源地区 2000~2020 年 3 期各景观组分的相关景观指数计算。

表 1 景观格局指数选取及指示意义

Tab. 1 Selection and indicative significance of landscape pattern index

景观单元特征指数	指标选取	指示意义
景观面积度量指标	斑块类型面积(CA)	CA值的大小影响着斑块类型聚集地中的物种数量及丰度
	斑块类型比(PLAND)	PLAND指某一斑块类型占整个景观面积的相对比例
	最大斑块指数(LPI)	LPI主要表示某一景观类型最大斑块占整个景观面积的比例,决定了景观优劣斑块,反应景观变化受人类活动干扰程度
	景观面积(TA)	TA定义景观幅度,是监测生态系统是否稳定的重要指标
景观形状指标	景观形状指数(LSI)	LSI反映景观和斑块形状的分散和规则程度,值越大说明景观形状越复杂
景观邻近度指标	香农多样性指数(SHDI)	SHDI表示景观类型的复杂程度,值越小斑块类型越少,值增大说明斑块类型增加或各斑块类型在景观中呈均衡化趋势分布
景观聚集与分散度测量指标	蔓延度指数(CONTAG)	CONTAG反映景观类型的聚集程度和延展程度,高蔓延度值表明某种优势斑块类型具有良好的连通性
	散布与并列指数(IJI)	IJI反映斑块类型的隔离分布情况
	聚集度指数(AI)	AI是基于栅格数量来测度景观或者某种斑块类型的聚集程度

注:各景观格局指数计算公式和详细意义可参阅相关文献(何鹏等, 2009; 孙天成等, 2019)。

3 结果与分析

3.1 典型生态地质剖面与生态关键带解剖

基于生态关键带基岩-成土母质-土壤-植被垂向调查思路(图 3),笔者绘制区内基岩-成土母质-土壤-

植被变化图(图 4)和典型生态地质剖面(图 5)。

金陵寺镇-柿园街生态地质剖面显示(图 2a、图 4),研究区南部的三叠纪中酸性侵入岩建造、古生代酸性侵入岩建造、前寒武纪酸性侵入岩建造的基岩节理发育,成土母质为中酸性岩类风化物,中酸性花岗岩的成土母质层和淀积层相对较薄(图 3),在中山

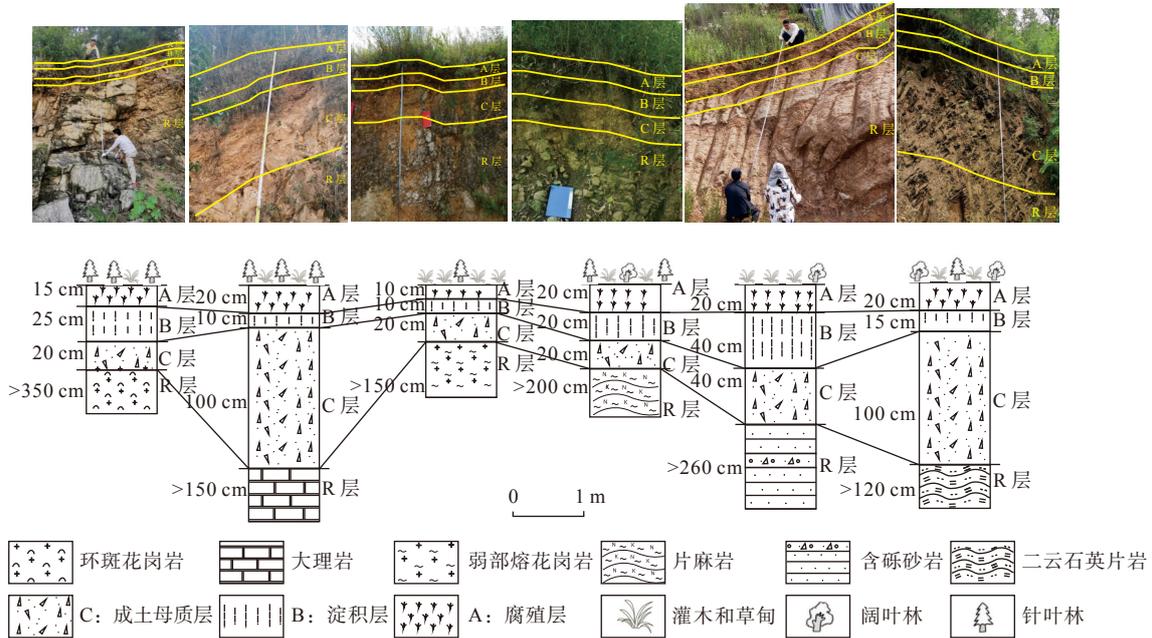


图 3 丹江源地区不同生态关键带基岩-成土母质-土壤-植被变化图

Fig. 3 Changes of bedrock, parent material, soil and vegetation in different ecological key zones of Danjiangyuan area

区形成的土壤类型为棕壤, 质地为沙质土, 结构疏松, 透水性好, 含水性、保水性差, 上覆植被类型为针阔叶混交林, 因土壤 pH 值呈酸性, 针叶油松较发育(图 3、图 4)。在低山丘陵区主要形成粗骨土, 砂砾含量高, 植被郁闭度稍低, 植被类型为以阔叶为主的针阔混交林。南部的古生代基性火山岩、基性-超基性侵入岩建造和前寒武纪基性火山岩建造的基岩易风化解体, 形成较厚的风化层, 质地一般为壤质, 保水性能强, 呈中性或弱碱性, 在中山区形成棕壤, 在低山丘陵区形成淋溶褐土。

杨峪河镇麻街岭-任家村生态地质剖面显示(图 2a、图 5), 区内中部的白垩纪—古近纪陆相砂泥质碎屑岩建造, 其地层产状平缓, 节理不发育或仅发育风化节理等, 成土母质为白垩纪—古近纪砂泥岩类风化物, 例如含砾砂岩风化形成的淀积层较厚(图 3), 在低山丘陵区 and 中山区均形成紫色土, 土体浅薄, 质地为沙质土, 有机质含量低, 保水性差, 水土流失易发, 植被覆盖类型主要为草本植物(图 3、图 5)。研究区中部的寒武纪碎屑岩建造的片理化和节理发育, 泥质含量高, 易风化, 质地一般为壤质, 在中山区形成棕壤, 在低山丘陵区形成淋溶褐土。上覆植被郁闭度高, 林型为以栓皮栎等阔叶林为主的针阔混交林(图 3、图 5)。前寒武纪碳酸盐岩建造的岩石质地坚硬, 不易风化, 例如大理岩的成土母质层较厚(图 3), 在中山区

和低山丘陵区形成淋溶褐土, 在河谷川塬区形成石质土, 多处出现裸露基岩, 植被覆盖以草本为主, 零星分布少量低矮灌木和油松(图 5)。

不同的地质建造, 因为岩性不同、形成时代不同, 受控于不同的构造地质背景和环境背景, 导致形成不同的地形地貌、成土母质、土壤类型、水文类型、局部小气候类型, 在以上立地条件的综合影响下, 最终形成不同的植被覆盖类型和景观格局, 以期为地方政府实施国土空间分区管控提供地学依据。

3.2 土地利用时空演变分析

3.2.1 土地利用动态变化

借助 ENVI 5.3 提取研究区的土地利用类型、分布、规模等信息。依据《土地利用现状分类》标准, 将研究区土地类型分为林地、草地、耕地、水域、建设用地及未利用土地 6 类。通过 2000、2010、2020 年 3 期土地利用类型的遥感解译, 结合研究区年际土地变更成果数据进行土地利用类型监测, 研究区土地利用现状整体表现为不同土地利用类型面积随时间变化存在差异。

从土地利用类型数量结构(图 6)来看, 丹江源地区位于秦巴山地, 气候温暖湿润, 降水相对丰沛, 是中国南水北调中线工程重要水源地, 也是重要的生物多样性保护和水源涵养生态功能区, 加之多山少田的地理特征, 土地利用结构中林地比例占绝对优势; 其次

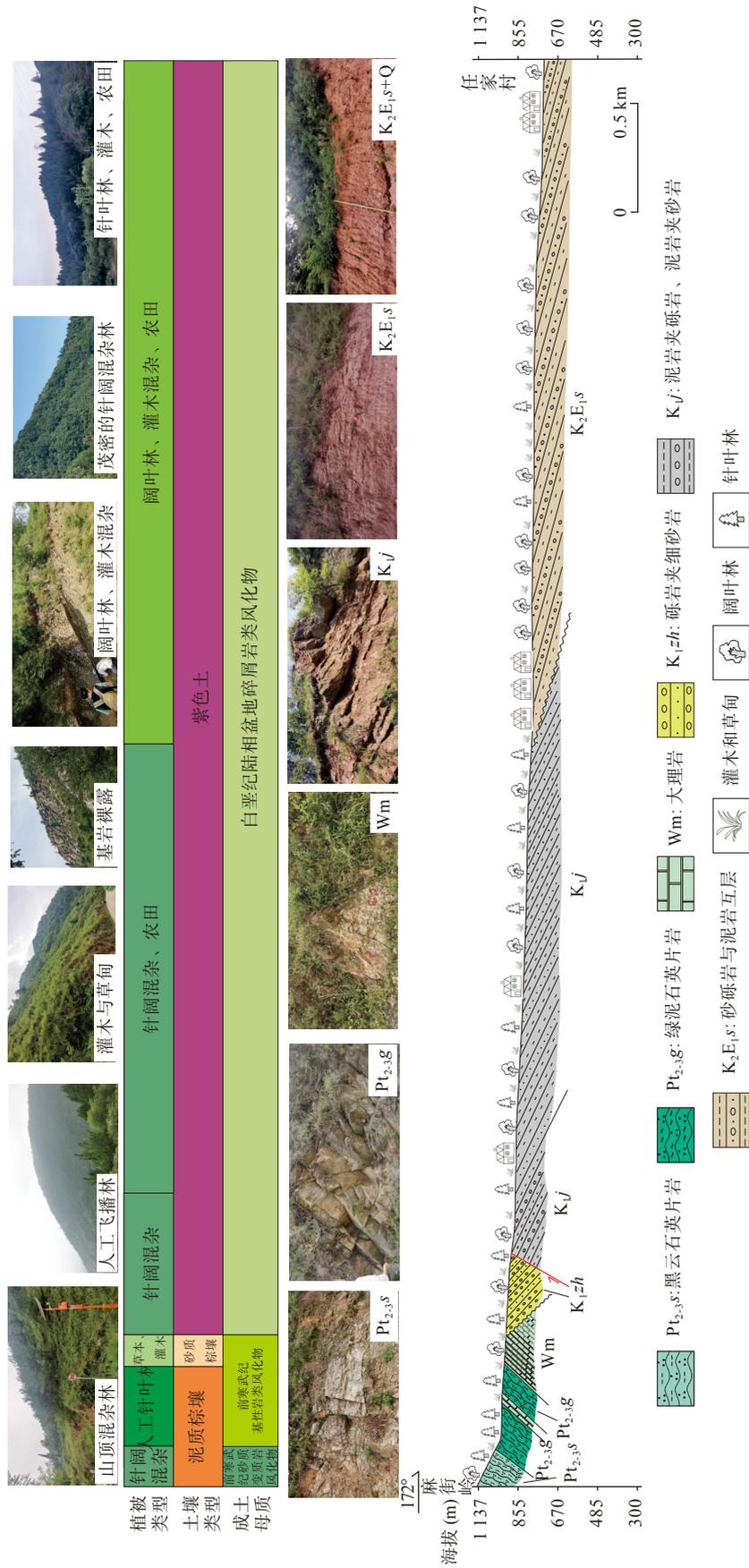


图 5 丹江源地区杨峪河镇麻街岭-任家村生态地质剖面
 Fig. 5 Eco-geological profile of Majelting-Renjia village in Yangyuhe town, Danjiangyuan area

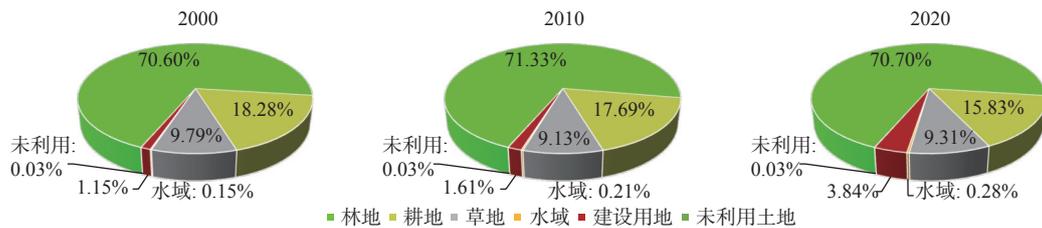


图6 丹江源地区2000、2010、2020年不同土地利用类型数量结构

Fig. 6 Quantitative structure of different land use types of Danjiangyuan area in 2000, 2010 and 2020

是耕地,林地和耕地占比约85%以上,其他用地类型比例偏低。研究区内的自然景观和人造景观之间转入转出频繁,自然景观转出面积大小排序为:草地>林地,林地基数大,变化不显著。人造景观耕地转出明显,建设用地、水域大幅转入,转入面积大小排序为:建设用地>水域,因研究区未利用土地多为利用度不高的裸地,其转入转出幅度变化不大。

土地利用动态差异较明显(表2),建筑用地和水域变化最明显。建设用地动态表现为持续扩张趋势,2000~2020年建设用地动态增长长度为11.70%,其中2000~2010年动态增长长度为3.98%;2010~2020年增长速度较快,动态增长长度为13.89%。这表明建设用地扩张主要发生在2010~2020年。2000~2020年水域动态增长长度为8.51%,水域呈持续扩张趋势,其中2000~2010年的动态增长长度为3.54%;2010~2020年的动态增长长度为3.66%,在后期变化较大。林地基数大,2000~2020年动态增长长度为0.01%,其中,2000~2010年增长长度仅为0.1%,2010~2020年递减率为-0.09%。草地的动态变化不大,呈先增长后递减趋势,耕地呈持续递减趋势,未利用土地动态变化不明显。

表2 丹江源地区2000~2020年土地动态变化

Tab. 2 Changes of land dynamic attitude from 2000 to 2020 in Danjiangyuan area

土地利用类型	土地动态度		
	2000~2010年	2010~2020年	2000~2020年
耕地	-0.32%	-1.05%	-0.67%
林地	0.10%	-0.09%	0.01%
草地	-0.67%	0.20%	-0.24%
水域	3.54%	3.66%	8.51%
建设用地	3.98%	13.89%	11.70%
未利用土地	-0.08%	0.07%	-0.05%

3.2.2 土地利用空间变化

丹江源地区受地形条件,土地利用格局具有特殊性(图7)。林地占绝对优势,以天然林区为主,主要分布在杨斜镇、麻街镇、板桥镇、沙河子镇,草地主要分

布在腰市镇、城关街道,耕地和建设用地分布规律明显,耕地主要分布在河谷川塬两岸及东北部的腰市镇、大荆镇,建设用地均分布于水系两岸,城区建设用地分布于丹江主河道两岸。不同土地利用类型时空转移特征明显,其中,耕地与林地之间的时空转移特征变化明显,且耕地向林地转移较明显,变化区域随时间变化先由中部向两侧扩散;耕地与建设用地之间的变化区域主要集中在商州城区、腰市镇和大荆镇,呈带状分布(图7),这与城市发展和经济发展有关。研究区未来的土地利用格局仍以林地为主,但林地有退化趋势,且耕地后备资源不足,说明土地利用结构尚需进一步优化。

2000~2020年土地利用时空演变结果总体显示丹江源的生态趋势向好有所改善。早期,当地居民伐林开垦,大规模修建坡耕地。2006年,商洛市积极调整土地利用结构及方式,以生态清洁小流域为生态建设单元,经过多年的综合治理和发展,当地生态环境得到了极大的改善。2011年底,圆满完成陕西省丹江口库区及上游水土保持一期工程的建设。2012年,商洛市启动陕西省丹江口库区及上游水土保持二期工程,2014年已顺利实现“清水进京”的宏伟目标,自通水至今,丹江的监测断面水质全部达到功能区标准。在生态建设保护的政策引导下,丹江源地区的土地利用变化对生态环境扰动较少。林地和耕地将长期是水源地主要土地利用类型,直接影响着其生态环境效应。

由于南水北调中线工程建设的需要,一方面,当地政府及民众对水源地和林地的保护意识不断增强,对公共资源的使用日趋合理,特别是对“山水林田湖草”生态文明建设的贯彻执行,进一步保障了研究区林地基数和水域面积的稳定增长,对可持续发展政策的实施有很大的正面效应。另一方面,由于调水工程及城市化进程建设以及保护水源地的移民搬迁,区内建设用地大幅度增加,存在草地退化和耕地减少现象。

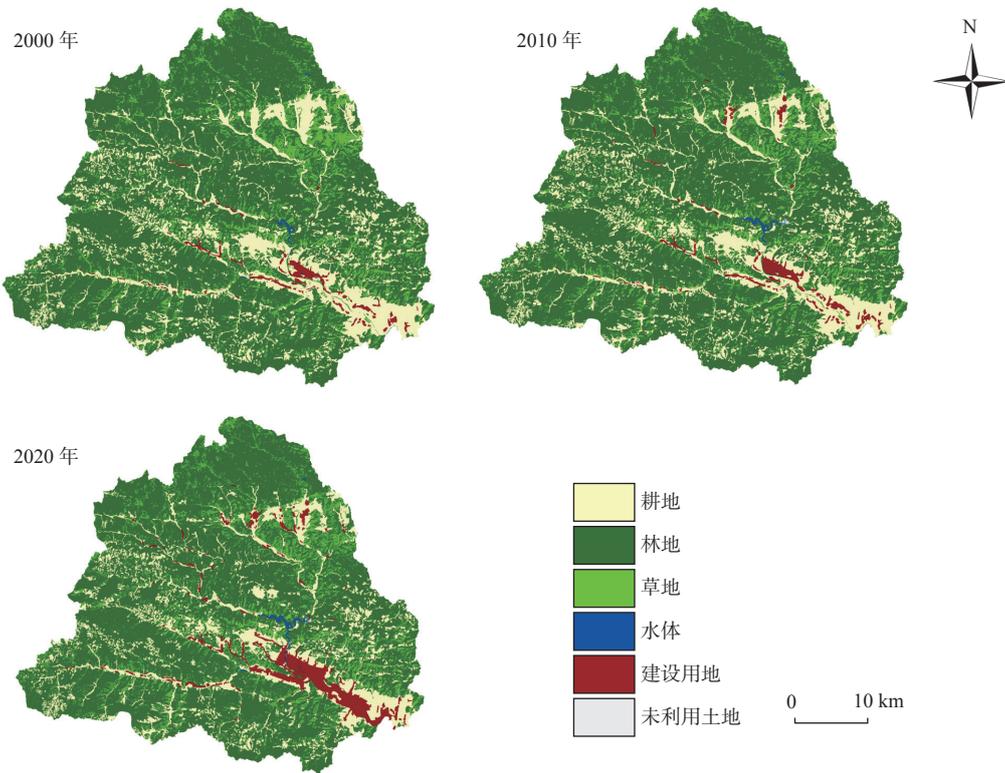


图 7 丹江源地区 2000、2010、2020 年土地利用类型遥感解译变化图

Fig. 7 Remote sensing interpretation changes of land use types of Danjiangyuan area in 2000, 2010 and 2020

作为南水北调中线工程典型的山区水源地,今后应合理配置土地资源,优化土地利用结构,加强林地和耕地保护,将有利于丹江源地区社会经济和资源环境的可持续发展。受自然环境条件和社会经济水平限制,该区也是经济限制发展区。水源保护工作取得了一定成效,但还存在生态保护与经济发展矛盾突出、治污项目资金缺口大等困难和问题。

3.3 景观格局动态变化分析

3.3.1 斑块类型水平下景观格局指数

结合土地利用变化的解译,利用 Frastats 4.2 软件,计算丹江源地区 2000~2020 年 3 期景观格局指数。在类型水平上(表 3),各土地利用类型的景观指数呈现出不同的变化趋势。林地景观具有很强的优势性,以其为代表的自然景观斑块呈现破碎状态。从 2000~2020 年的斑块类型比 PLAND 数据来看,未发生太大变化,呈微弱的减少趋势。人造景观耕地则呈现先增加后减少的变化趋势,草地变化趋势相反,先减后增,表明区内景观生态过程较活跃。

从景观形状指数 LSI 变化趋势可知,耕地、草地的景观形状指数较大且总体呈现上升趋势,反映了区

内耕地、草地景观和斑块形状分散且不规则,说明二者的景观形状比较复杂。林地和水域的景观形状指数有所下降,建设用地的景观形状指数呈上升趋势。以建设用地为代表的人造景观斑块面积呈现增大趋势,2000~2010 年增长不明显;2010~2020 年增长迅速,斑块呈现片状分布。合理的土地利用规划让建设用地聚集程度提高,边界规则化,特别是移民搬迁政策的执行,使得建设用地聚集程度高。水域斑块类型面积呈现增加的趋势,斑块类型比和最大斑块指数总体呈上升趋势,不断增加并趋于平稳,水域占研究区面积的比例持续上升,散布与并列指数减小,景观形状指数和聚集度指数与水域相邻的景观要素变少,连通性增强。

3.3.2 景观水平下景观格局指数

景观水平的景观格局指数显示(表 4),2000~2020 年间丹江源地区的景观结构发生了变化,景观形状指数 LSI 呈现先有微弱减小后又增加趋势,总体呈增加,各类景观趋于离散,且形状趋于规则;蔓延度指数 CONTAG 在 2000~2020 年间先增加后减小,总体呈增大趋势,反映景观类型的聚集程度和延展程度,各景观之间连通性较好。散布与并列指数 IJI 呈减小

表3 丹江源地区2010~2020年3期斑块类型水平的景观格局指数

Tab. 3 Landscape pattern indices of patch types in the Danjiangyuan area from 2010 to 2020

斑块类型	年份	CA(km ²)	PLAND(%)	LPI(%)	LSI	IJI	AI
林地	2000	1 240.430 0	76.030 0	72.640 0	17.457 0	39.683 1	98.045 0
	2010	1 253.270 0	75.870 0	72.460 0	17.651 0	34.324 0	98.020 4
	2020	1 242.210 0	75.190 0	71.490 0	16.827 1	37.679 4	98.110 0
耕地	2000	321.120 0	20.810 0	20.210 0	53.520 4	53.935 4	88.062 5
	2010	310.870 0	21.020 0	20.470 0	53.112 7	47.025 9	88.209 5
	2020	278.170 0	20.810 0	17.160 0	57.316 3	48.395 7	87.200 0
草地	2000	171.990 0	2.740 0	0.190 0	84.853 1	28.333 3	47.191 6
	2010	160.390 0	2.530 0	0.050 0	85.827 9	23.765 6	44.299 2
	2020	163.640 0	2.750 0	0.050 0	95.866 0	19.975 0	40.361 5
水域	2000	2.680 0	0.040 0	0.030 0	8.122 0	71.113 5	62.707 5
	2010	3.630 0	0.060 0	0.040 0	6.565 2	62.662 6	73.770 5
	2020	4.960 0	0.080 0	0.070 0	6.703 7	72.204 6	77.809 8
建设用地	2000	20.180 0	0.340 0	0.100 0	12.769 9	47.873 0	78.503 3
	2010	28.220 0	0.470 0	0.140 0	13.225 6	42.946 0	81.082 0
	2020	67.410 0	1.130 0	0.800 0	14.839 8	49.561 8	86.407 0
未利用土地	2000	0.470 0	0.040 0	0.080 0	2.193 8	31.574 3	38.842 7
	2010	0.500 0	0.050 0	0.090 0	2.747 2	32.267 4	39.375 4
	2020	0.490 0	0.040 0	0.080 0	2.358 4	31.683 2	38.712 0

注：由于各土地利用类型斑块类型面积统计存在四舍五入，面积总和与研究区总面积有略微出入。

表4 丹江源地区2000~2020年景观水平的景观格局指数

Tab. 4 Landscape pattern index of the Danjiangyuan area from 2000 to 2020

年份	TA(km ²)	LSI	CONTAG	IJI	SHDI	AI
2000	1 757.000 0	27.822 9	73.295 7	45.502 6	0.655 7	94.495 0
2010	1 757.000 0	27.772 0	75.905 8	39.219 0	0.659 6	94.507 0
2020	1 757.000 0	29.737 8	74.704 0	40.413 2	0.696 3	94.102 8

注：TA.景观面积；LSI.景观形状指数；CONTAG.蔓延度指数；IJI.散布与并列指数；SHDI.香农多样性指数；AI.聚集度指数。

趋势,反映了区内斑块类型的隔离分布情况,丰富度变低。香农多样性指数 SHDI 在 2000~2020 年间增加了 0.031,说明区内的各斑块类型呈均衡趋势分布,土地利用类型越来越丰富,景观邻近度变好。聚集度指数 AI 在 2000~2010 年有上升,在 2010~2020 年有下降,先增加后减小。

2000~2010 年,水域面积、林地面积及建设用地增加,耕地和草地面积减少,南水北调中线工程的建设,及从保护和改善生态环境出发退耕还林政策的实施,保障了丹江源地区水域面积和林地面积的增长;另一方面是移民搬迁政策,使原本分散的聚居地转为城镇、移民新村等,整体上建设用地面积增加,聚集度

提升。2010~2020 年,水域、草地及建设用地增加,林地、耕地面积减少,当地政府加大生态文明建设,对水源地及特殊土地类型湿地的保护政策不断推进,保障了水域面积的稳定增长,尤其是湿地保护成效显著,但随着近十年城市发展建设的需求,建设用地增加幅度较大,人口增长和社会需求也加速了土地利用程度的变化。

4 结论

(1)各地质建造因构造地质背景差异导致上覆地形地貌、成土母质、土壤类型、水文类型、局部小气候

类型,在以上立地条件的综合影响下形成了不同的生态地质格局。

(2)丹江源地区林地比例占绝对优势,林地和耕地占比85%以上,其他土地类型比例偏低。2000~2020年土地利用类型变化显著,水域、耕地和建设用地面积变化较为剧烈。区内自然景观和人造景观之间转入转出频繁,但整体土地利用变化对生态环境扰动较少。林地和耕地将长期是水源地主要的土地利用类型,直接影响着其生态环境效应。

(3)丹江源地区2000~2020年景观空间格局变化明显,尤其在2010~2020年景观生态过程较活跃。区内各斑块类型趋于规则呈均衡趋势分布,斑块类型间形成了良好的连接性,景观聚集程度逐渐提升,空间分布趋向集中。

(4)南水北调中线工程建设进一步保障了研究区林地基数和水域面积的稳定增长,丹江源地区的生态趋势向好;调水工程及城市化进程建设及保护水源地的移民搬迁导致区内建设用地大幅度增加,存在草地退化和耕地减少现象。建议合理配置土地资源,优化土地利用结构,加强林地和耕地保护及生态补偿,将有利于丹江源地区社会经济和生态环境的可持续发展。

致谢:在本文撰写过程中得到国际竹藤中心漆良华教授、博士生张建的帮助,商洛市自然资源局、商洛市林业局、商州区林业局等兄弟单位在资料收集方面给予了大力支持,在此一并致谢。

参考文献(References):

- 陈利顶,刘洋,吕一河,等.景观生态学中的格局分析:现状、困境与未来[J].生态学报,2008,(11):5521-5531.
- CHEN Liding, LIU Yang, LÜ Yihe, et al. Landscape pattern analysis in landscape ecology: current, challenges and future[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, (11): 5521-5531.
- 陈利顶,孙然好,刘海莲.城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(4):1042-1050.
- CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progress' problems' and perspectives[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1042-1050.
- 陈文波,肖笃宁,李秀珍.景观指数分类、应用及构建研究[J].应用生态学报,2002,13(01):121-125.
- CHEN Wenbo, XIAO Duning, LI Xiuzhen. Classification, application, and creation of landscape indices[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2002, 13(01): 121-125.
- 中国科学院计算机网络信息中心科学数据中心.地理空间数据[DB].地理空间数据云官网.<http://www.gscloud.cn>.
- 国家气象科学数据中心.中国地面气候资料月值数据集[DB].国家气象科学数据中心,1951-2020.
- 何鹏,张会儒.常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J].林业科学研究,2009,22(04):470-474.
- HE Peng, ZHANG Huiru. Study on factor analysis and selection of common landscape metrics[J]. *Forest Research*, 2009, 22(04): 470-474.
- 李文明,李健强,徐永,等.西北生态地质调查研究进展与展望[J].西北地质,2022,55(03):108-119.
- LI Wenming, LI Jianqiang, XU Yong, et al. Progress and Prospects of Ecological Geological Survey in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(03): 108-119.
- 李煜东,臧传富,陈相龙.淮河流域1990-2015年间土地利用时空变化特征及驱动机制研究[J].生态科学,2020,39(02):104-113.
- LI Yudong, ZANG Chuanfu, CHEN Xianglong. Research on temporal and spatial variation characteristics and driving mechanism of land use in Huaihe River Basin from 1990 to 2015[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(02): 104-113.
- 聂洪峰,肖春蕾,戴蒙,等.生态地质调查工程进展与主要成果[J].中国地质调查,2021,8(01):1-12.
- NIE Hongfeng, XIAO Chunlei, DAI Meng, et al. Progresses and main achievements of ecological survey project[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(01): 1-12.
- 潘贤章,施建平.全国第二次土壤普查典型土种的剖面数据库(1980-1996)[DB].国家地球系统科学数据共享平台-土壤科学数据中心,2015.
- 陕西师范大学地理系.陕西省商洛地区地理志[M].西安:陕西人民出版社,1981.
- Department of Geography, Shaanxi Normal University. Geography of Shangluo, Shaanxi Province [M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 1981.
- 苏明伟,张伟峰,杜鹃,等.2010-2018年陕西省LUCC动态变化分析[J].湖北农业科学,2021,60(05):29-34.
- SU Mingwei, ZHANG Weifeng, DU Juan, et al. Analysis on the dynamic changes of LUCC in Shaanxi province from 2010 to 2018[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(05): 29-34.
- 孙天成,刘婷婷,褚琳,等.三峡库区典型流域“源”“汇”景观格局时空变化对侵蚀产沙的影响[J].生态学报,2019,39(20):7476-7492.
- SUN Tiancheng, LIU Tingting, CHU Lin, et al. Effects of temporal and spatial variations in source-sink landscape patterns on soil erosion and sediment yield from typical watershed in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7476-7492.

- 王京彬, 卫晓锋, 张会琼, 等. 基于地质建造的生态地质调查方法-以河北省承德市国家生态文明示范区综合地质调查为例[J]. 中国地质, 2020, 47(06): 1611-1624.
- WANG Jingbin, WEI Xiaofeng, ZHANG Huixiong, et al. The ecological survey based on geological formation, exemplified by integrated geological survey of National Ecological Civilization Demonstration Area in Chengde City, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 2020, 47(06): 1611-1624.
- 王天山, 郑寒. 城市化过程中环洱海区域土地利用及景观格局变化分析[J]. 生态经济, 2016, 32(01): 181-185.
- WANG Tianshan, ZHENG Han. Analysis of land use and landscape pattern change in Erhai lake during rapid urbanization[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(01): 181-185.
- 王尧, 张茂省, 杨建锋. 中国地质环境脆弱性评价[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 198-206.
- WANG Yao, ZHANG Maosheng, YANG Jianfeng. Evaluation Research on the Fragility of Geological Environment in China[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 198-206.
- 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- WU Jianguo. *Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- 岳德鹏, 王计平, 刘永兵, 等. GIS与RS技术支持下的北京西北地区景观格局优化[J]. 地理学报, 2007, (11): 1223-1231.
- YUE Depeng, WANG Jiping, LIU Yongbing, et al. Landscape pattern optimization based on RS and GIS in northwest of Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, (11): 1223-1231.
- 张建, 雷刚, 漆良华, 等. 2003-2018年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1280-1290.
- ZHANG Jian, LEI Gang, Qi Lianghua, et al. The landscape pattern and ecological service value in Danjiangkou City under land use change from 2003 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1280-1290.
- 张林, 李来新, 马东民, 等. 景观格局及生态系统服务价值响应-以千阳县为例[J]. 西北地质, 2022, 55(01): 274-283.
- ZHANG Lin, LI Laixin, MA Dongmin, et al. On the Landscape Pattern Change and the Ecological Service Value Response: Taking Qianyang County as an Example[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(01): 274-283.
- 张茂省, 王尧, 薛强. 资源环境承载力评价理论方法与实践[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 1-11.
- ZHANG Maosheng, WANG Yao, XUE Qiang. Evaluation of Resource Environment Carrying Capacity: Theoretical Method and Practice[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 1-11.
- 张晓宁, 刘学录, 王全喜, 等. 盐池县土地利用自然生态位变化及其对景观格局的影响[J]. 生态科学, 2020, 39(01): 156-163.
- ZHANG Xiaoning, LIU Xuelu, WANG Quanxi, et al. The change of natural niche of land use and its influence on landscape pattern of Yanchi County[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(01): 156-163.
- 张雁, 李占斌, 刘建林. 南水北调中线商洛水源地生态安全评价[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 32-36.
- ZHANG Yan, LI Zhanbin, LIU Jianlin. Ecological safety assessment on Shangluo water area of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(19): 32-36.
- 张雁. 山区水源地建设的生态环境效应评价与保护研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- ZHANG Yan. Ecological environmental assessment and protection of water source construction projects in mountainous area: a case study in Shagnluo water source area[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- Chen Fei, Chen Jun, And Wu Hao, et al. 2016. A landscape shape index-based sampling approach for land cover accuracy assessment[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59: 2263-2274.
- Chen Jin, Zhu Xiaolin, And Vogelmann James E., et al. A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM SLC-off images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(4): 1053-1064.
- Chen Jun, Ban Yifang, Li Songnian. China: Open access to Earth land-cover map[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 434-434.
- Moser D, Zechmeister H G, Plutzer C, et al. Landscape patch shape complexity as an effective measure for plant species richness in rural landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2002, 17(7): 657-669.
- Robert Costanza. Ecological Economics: reintegrating the study of humans and nature[J]. *Nature Sciences Société*, 1997, 5(2): 90.
- Veldkamp A, Verburg P H. Modelling land use change and environmental impact[J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 72(1-2S1): 1-3.
- Zhu Xiaolin, Chen Jin, And Gao Feng, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2610-2623.