



引文格式: 徐永, 聂浩刚, 冀显坤, 等. 陕北榆林地区植被好转背景下面临的生态环境新挑战[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 308–318. DOI: 10.12401/j.nwg.2023193

Citation: XU Yong, NIE Haogang, JI Xiankun, et al. Ecological Risk of Yulin Area in Northern Shaanxi Under the Condition of Vegetation Coverage Improving[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 308–318. DOI: 10.12401/j.nwg.2023193

陕北榆林地区植被好转背景下面临的 生态环境新挑战

徐永^{1,2}, 聂浩刚^{1,2,*}, 冀显坤^{1,2}, 乔冈^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 自然资源部陕西榆林地下水与生态
野外科学观测研究站, 陕西 西安 710119)

摘要: 近几十年来, 随着退耕还林还草等政策的实施, 榆林地区植被覆盖度明显提高, 生态环境明显好转。但与此同时, 河流流量减少, 地下水位下降等问题也逐渐凸显, 对其进行梳理总结并提出针对性的对策建议对榆林地区可持续发展具有重要意义。笔者在充分收集前人资料的基础上, 全面梳理了榆林地区近年来出现的各种问题, 并分析了可能的原因, 最后提出对策建议。通过研究发现, 近 20 年以来榆林地区植被指数呈现明显增加的趋势, 林草地面积大幅度增加, 荒漠化土地面积显著减少。同时, 榆林地区较大的河流径流量近 50 年来普遍减少, 尤其以无定河、秃尾河、窟野河最为明显。区域地下水位普遍下降, 降幅 2~10 m 不等。近年来, 在西北部毛乌素沙地, 出现了大规模开垦耕地的现象。针对前述的问题, 建议榆林地区坚决落实以水定产的政策, 加强区内水资源优化配置, 加大矿井水和黄河水的利用, 以灌木林和草本为主进行植被恢复, 加强耕地开垦区地下水位和土地沙化的监测。研究榆林地区在新时期出现的生态环境问题及对策建议对于黄河中游生态脆弱区的资源型城市的可持续发展有一定的借鉴意义。

关键词: 生态地质; 河流流量减少; 地下水位下降; 调查监测; 陕北榆林

中图分类号: P66

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0308-11

Ecological Risk of Yulin Area in Northern Shaanxi Under the Condition of Vegetation Coverage Improving

XU Yong^{1,2}, NIE Haogang^{1,2,*}, JI Xiankun^{1,2}, QIAO Gang^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Observation and Research Station of Groundwater and Ecology in Yulin, Shaanxi, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: In recent decades, with the mega-eco-environmental projects, such as “Grain for Green Project”

收稿日期: 2023-08-10; 修回日期: 2023-10-30; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“西北地区自然资源动态监测与风险评估(DD20230106 和 DD20211393)”, 陕西省重点研发计划“黄河流域(陕西段)生态安全格局构建、评价与风险管控关键技术研究(2021ZDLSF05-01)”, “中亚关键矿产空地一体勘查技术应用示范与卫星产业合作交流(2023-GHZD-38)”和国防科工局高分专项“黄河上中游重点区域生态保护与高质量发展产业化应用(91-Y50G32-9001-22/23)”联合资助。

作者简介: 徐永(1981-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事环境地质生态地质研究。E-mail: xyxuyong@163.com。

* 通讯作者: 聂浩刚(1973-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事环境地质方面的研究。E-mail: nhaogang@163.com。

performed, the vegetation coverage in Yulin area has increased notably and the ecological environment has improved significantly. At the same time, the river discharge decreased, the groundwater level dropped, has become more prominent. Summarize these possible risks and put forward some pertinence countermeasures are of great significance for the sustainable development of Yulin area. Based on existing data, the article sort out various problems that occurred in recent years in Yulin area. And then analyzed the possible reasons, and finally put forward some suggestions. The results show that the average annual NDVI of Yulin City increased obviously, grassland and forest increased rapidly, and the desertification land reduced clearly in last 20 years. But in the mean time, the discharge of larger rivers in Yulin area has decreased obviously in the past 50 years, especially the Wuding River, Tuwei River, and Kuye River. The groundwater level in the whole area of Yulin dropped about 2-10 m. In recent years, Yulin City began to reclaim cultivated land in the sandy land on a large scale by using the cropland balance policy. In view of the problems occurred in recent years are mostly related to water, so the Yulin area should resolutely implement the policy of water-based production, strengthen the optimal allocation of water resources, increase the utilization of mine water and the water of Yellow River. Vegetation restoration should mainly dominated by shrubs and herbs. The ecological environment problems occurred in recent years, and countermeasures and suggestions of the Yulin can provide reference materials for the sustainable development of resource-based cities in the ecologically fragile area of the middle reaches of the Yellow River.

Keywords: eco-geological; river discharge decreased; groundwater level dropped; investigation and monitoring; Yulin in Northern Shaanxi

陕北榆林地区地处毛乌素沙地与黄土高原过渡地带, 风蚀与水蚀同时存在, 生态环境较为脆弱。近年来随着退耕还林还草等政策的实施, 榆林地区植被盖度明显增加, 生态环境逐渐好转, 属于中国北方荒漠化治理的较为成功的典范。综合分析榆林地区生态环境好转的具体原因, 退耕还林政策, 三北防护林、京津风沙源治理等国家林业重点工程, 煤矿区的生态修复治理等无疑是最主要的原因之一。但在生态环境好转的背景下, 榆林地区近年来也出现了一系列新的生态环境问题, 如局部地区地下水位下降, 大多数河流流量减少, 生态系统不稳定等等。因此, 人类工程活动的正负效应在陕北榆林地区表现的异常突出, 随着该地区资源开发规模和力度的加大, 无疑会加剧这种效应, 影响陕北榆林地区可持续发展以及黄河流域高质量发展。

笔者在充分收集前人资料的基础上, 全面梳理了榆林地区近年来出现的各种问题, 并分析了可能的原因, 最后提出了对策建议。对于黄河中游生态脆弱区和资源型地区的可持续发展具有一定的借鉴意义。

1 研究区概况

榆林地区处于陕西省的最北部, 与甘宁晋蒙交界,

东部隔黄河与山西省相望, 西部连接甘肃和宁夏, 南部与陕西省延安市接壤, 北部与内蒙古自治区鄂尔多斯市相连。榆林市行政区划形似三角形, 位于 $E 107.28^{\circ} \sim 111.15^{\circ}$, $N 36^{\circ}57' \sim 39^{\circ}35'$, 东西最大长度为 309 km, 南北最大宽度为 295 km, 总面积约为 4.3 万 km^2 , 约占陕西省总面积的 20.9 %。

榆林地区地处毛乌素沙地和黄土高原过渡区, 总体地势特征从西北向东南倾斜, 海拔一般为 800~1 800 m。西南部略高, 平均海拔于 1 600~1 800 m 变化, 其他地区海拔为 1 000~1 200 m (图 1)。大致以神

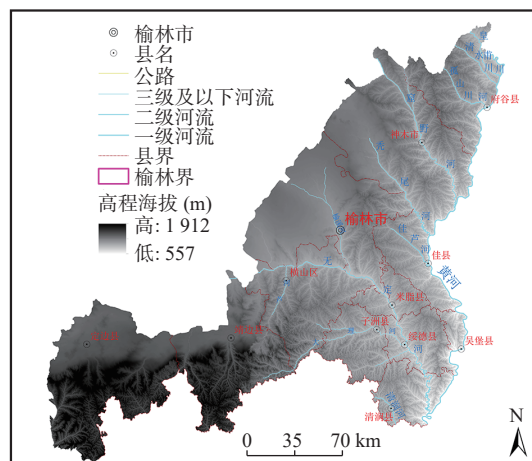


图1 榆林市数字高程图

Fig. 1 The digital elevation map of Yulin area

木县中鸡-锦界-榆阳区麻黄梁-榆林城区-横山县白界-横山县城-靖边高家沟-靖边县城-宁条梁-定边县安边-砖井-红柳沟为界,西北部为风沙(滩地)区,属毛乌素沙地东南缘,海拔为 1 200~1 500 m,沙丘沙地绵延不断,滩地、海子星罗密布,地形较平坦,相对高差为 10~15 m,沟谷切深一般为 30~50 m。东部和南部是黄土高原丘陵地区,沟谷发育且深切,黄土梁、峁、沟壑发育,地形破碎,起伏较大,高程为 930~1 300 m,相对高差为 150~300 m(张茂省等, 2014)。

榆林降水呈现夏秋多、春冬少的特点,降水量东南多、西北少,年内和年际变化均大。按季分配是夏季占年降水量的 56.7%,秋季占 26.7%,春季占 14.5%,冬季占 2.1%。榆林市及其周边地区 16 余个气象台(站)1959~2015 年近 57 年的降水资料综合分析,各地区年平均降水量除高石崖水文站外,均在 500 mm 以下,且降水量由东向西递减,其中韩家峁、横山、殿市等水文站年均降水量较低,均在 400 mm 以下。

榆林地区地处陕西北部,地形条件复杂,水资源相对匮乏,水系主要分为内流及外流两类。外流水系为黄河流域,是榆林市境内水系的重要组成部分,支流众多,比较大的河流有无定河、窟野河、秃尾河、佳芦河及皇甫川、孤山川、石马川、清水川组成的“四河四川”。清涧河、延河、洛河、泾河部分支流起源于此,但市域范围内流程短,水量小。内流河分布在毛乌素沙地西北部的沙漠闭流区。

2 研究方法

NDVI 归一化植被指数,可以较为准确地反映地表植被覆盖状况。本次研究基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用了最大值合成法生成了月度、年度植被指数数据。

土地利用类型选择榆林市 2000 年(退耕还林还草开始)、2010 年(人类工程活动影响显著)和 2018 年(现状)3 期遥感影像,进行植被覆盖及土地利用现状解译工作。榆林市全区土地利用类型解译以美国地质勘探局(USGS)网站下载的 Landsat 多光谱数据为主要的数源(采用 2000、2010 和 2018 年各年内 6~9 月各时段高质量遥感数据,云量控制在 10% 以内),并以 Google Earth 影像数据、公开发布的多个土地覆被/利用产品、MODIS 时间序列数据、DEM 数据等高空间分辨率影像和其他参考数据为辅助。各年份选择

生长季受云影响最小的影像作为基础解译影像,在对影像进行大气纠正、镶嵌和增强处理后,形成 2010 年、2010 年和 2018 年研究区遥感影像图。解译按照土地利用现状分类标准(GB/T21010-2007),分为耕地(旱地、水浇地)、林地(有林地、灌木林、疏林地、其他林)、草地(高覆盖、中覆盖、低覆盖)、水域(湖泊、河流、水库)、城镇工矿用地(城镇、乡村、厂矿)、未利用地等土地利用类型,采用面向对象的监督分类和人工目视解译结合的方法进行解译。训练样本来源于野外核查工作结果、公开的高分辨率遥感影像和公开发布的全球土地利用数据。

荒漠化程度采用遥感解译结合地面验证得出,2000 年选用美国 Landsat7(ETM)卫星影像数据,融合后空间分辨率为 15 m,接收时间分别为 6~9 月,数据的光谱覆盖范围为 0.45~2.35 μm 。2018 年选用高分一号卫星影像数据,空间分辨率为 8 m,重采样为 15 m 数据,接收时间分别为 6~9 月,数据的光谱覆盖范围为 0.45~0.89 μm 。采用专业遥感数据处理软件 PCI 和 ERDAS 对原始数据进行了大气纠正、融合、镶嵌和增强等处理。采用人工目视解译的方法开展了荒漠化专题的遥感解译。

地下水位变化,土壤水分现状,水资源利用现状,生态功能区生态问题及防治措施来自野外实地调查走访,典型点实测,《榆林市水资源公报》和《全国生态功能区划》。

3 近二十年来榆林植被覆盖度明显提高,沙化土地得到有效治理

3.1 NDVI 植被指数明显增加

1999~2018 年榆林市植被指数(NDVI)发生了明显的变化,NDVI 增加的区域占 91.11%,NDVI 保持不变的区域占 7.91%,NDVI 下降的区域占 0.98%(图 2)。

1999~2018 年,榆林市区域年 NDVI 均值呈增加趋势(图 3)。榆林市区域年 NDVI 均值从 1999 年的 0.259,增加到 2018 年的 0.548,表明榆林市植被覆盖度越来越高,整体向好。通过线性回归模拟出榆林市 NDVI 年变化趋势: $y=0.012 2x+0.299 1(R^2=0.845)$ 。

3.2 未利用地持续减少,林草地面积显著增加,国土绿化面积明显增加

通过 2000 年(退耕还林还草开始)、2010 年(人类工程活动影响显著)和 2018 年(现状)3 期遥感影像对

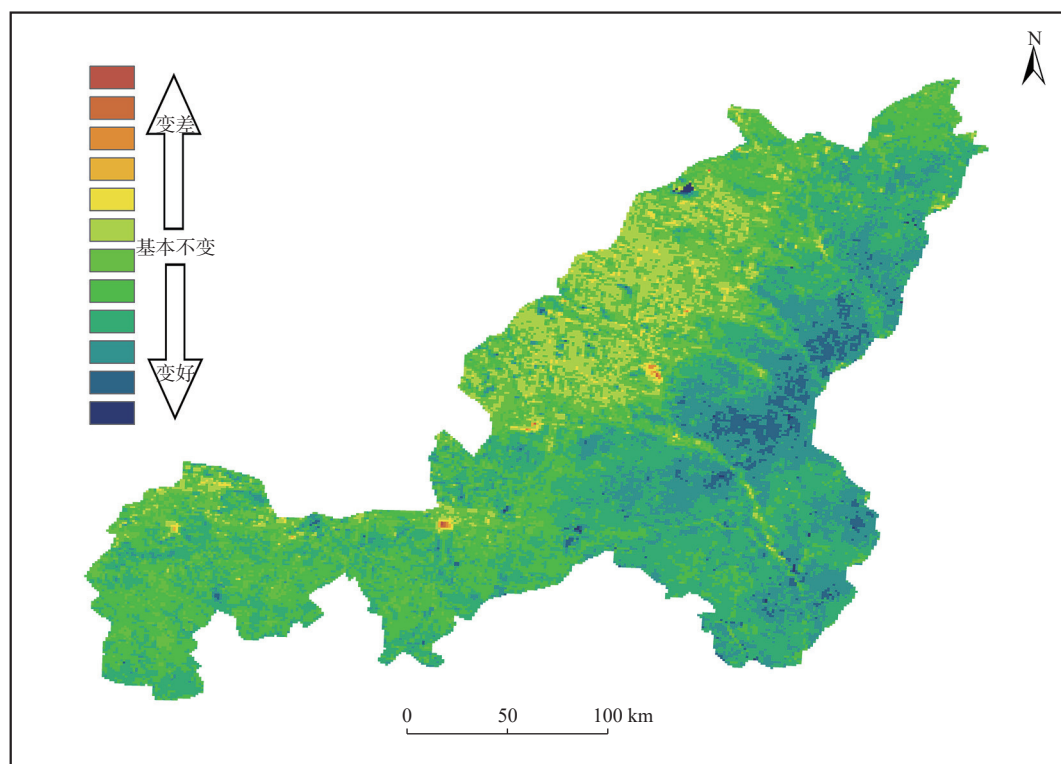


图2 1999年与2018年榆林市NDVI对比变化趋势

Fig. 2 Change of normalized difference vegetation index between 1999 and 2018

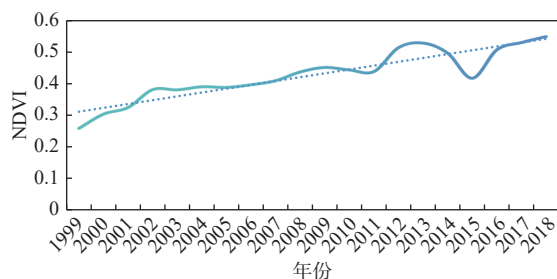


图3 1999~2018年榆林市NDVI年均值变化趋势

Fig. 3 The mean value of the Normalized Difference Vegetation Index from 1999 to 2018

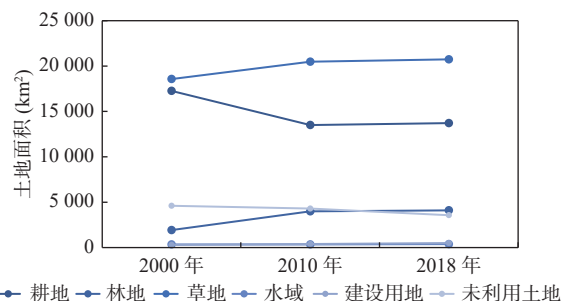


图4 2000~2018年榆林市土地利用类型变化

Fig. 4 Land use and cover change from 2000 to 2018

榆林市土地利用类型进行解译得出: 2000~2018年, 榆林市未利用地持续减少, 林地、草地和建设用地呈现出增加的趋势, 水域和耕地则是先减少后增加。2000~2010年间, 耕地、草地和林地的变化率都显著高于2010~2018年(图4)。2010年以前, 林草地占比较低, 退耕还林还草的效果显著, 2010年以后, 随着大规模退耕还林还草的实施, 整体林草地的覆盖度明显上升, 加之耕种条件差, 可供退耕的耕地面积的明显减少, 导致由耕地转变为林草地的趋势减缓, 侧面说明植被覆盖度越来越高。

前人对榆林地区的植被覆盖和土地利用变化进行了大量的研究(蔚霖等, 2009; 杨强等, 2015; 王涛等,

2017; 封建民等, 2018; 栾金凯等, 2018; 石玉琼等, 2018; 杨波等, 2019; 李亚丽等, 2021; Gu et al., 2021; Luo et al., 2021; Kou et al., 2021; 叶璇等, 2022; 张凡等, 2023), 目前基本上已经取得了如下共识: 榆林地区自1999年大规模的退耕还林还草以及其他各类工程实施以来, 植被覆盖度明显增加, 土地利用类型变化较大; 在各类土地利用类型中, 耕地和草地占比最大, 是榆林地区分布面积最广的两种土地利用类型; 未利用地明显减少, 大部分转化为草地; 耕地减少, 转化为林地和草地; 建设用地明显增加。

3.3 荒漠化程度明显减轻

通过遥感解译结合地面验证, 得出了2018年和2000年的荒漠化程度(图5)。结果表明, 2000~2018

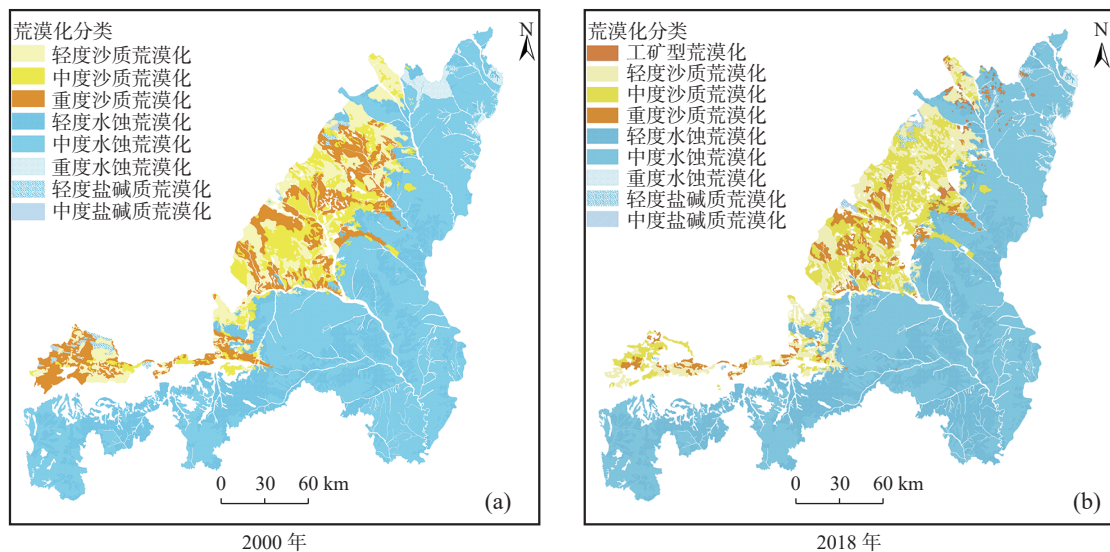


图5 榆林市 2000 年(a)和 2018 年荒漠化土地分布图(b)

Fig. 5 (a) The distribution of desertification land in Yulin of 2000 and (b) 2018

年水蚀荒漠化面积减少了 245 km²。沙质荒漠化土地面积减少了 1 722.68 km², 其中, 重度沙质荒漠化面积减少最为明显, 减少了 63%。此外, 零星分布的盐碱质荒漠化土地, 近二十年来有轻微的减少。值得注意的是, 在东北部矿区出现了工矿型荒漠化土地, 面积约 246.64 km²。

榆林市荒漠化程度得到有效遏制, 尤其是沙化土地的治理, 对全国治沙工作起到了引领和示范作用。已治理的沙化土地占沙化土地总面积的 93.24%, 约 5 733 km² 流沙得到了固定或半固定, 沙区植被平均覆盖度达到了 60%。经过多年的治理, 逐步形成了“带片网”、“乔灌草”相结合的区域性防护林体系和“南治土北治沙”的榆林治沙模式(李智佩等, 2002; 聂浩刚等, 2005; 杨忠信, 2018; 王枫等, 2021; 李文明等, 2022; 冯立等, 2023)。

4 榆林市植被覆盖度好转的背景下新的生态环境隐患

4.1 区域地下水位下降

通过水井调查和走访, 从 20 世纪 80 年代到 21 世纪初, 由于农业灌溉、生活用水和能源化工用水量的增加, 地下水位呈明显下降趋势(图 6), 最大下降量近 20 m。近年来加大了对浅层地下水的保护, 地下水位逐渐趋于稳定, 近几年来随着降雨量的增加, 加之部分地区煤矿排水, 西北部滩地地下水位有回升的趋

势, 部分低洼地出现积水。陶虹等(2016)通过监测得出陕北典型风沙滩地区浅层地下水位在 1995~2010 年整体波动下降, 呈强降弱升态势, 2010 年后, 水位逐年上升。范立民等(2018)通过调查监测发现, 榆林西北部毛乌素沙地与黄土高原接壤区泉群大幅度减少, 由 1994 年的 2 580 处减少到 2015 年的 376 处。徐友宁等(2022)对陕西大柳塔煤矿及周边进行调查, 发现采煤对矿区地下水位产生了较大影响, 部分泉水干枯, 但对沙地植被生态的影响不明显。冯立等(2023)综合前人资料认为, 榆-神-府矿区采煤对烧变岩含水层和第四系潜水含水层造成影响, 区域地下水水位下降 5~12 m, 且多数区域已经下降到基岩面以下, 直接影响地下水位浅埋区的植被生态, 加剧二次沙化。此外, 地下水位下降后, 水体、湿地面积也相应减少。从近年来调查监测结果发现, 榆林地区地下水位变化较为复杂, 整体上, 区域地下水位有下降的趋势, 但在西北

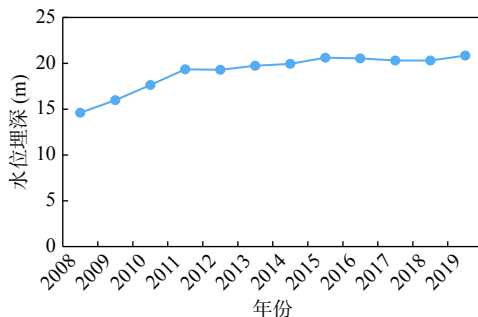


图6 神木市某监测孔地下水埋深动态变化图

Fig. 6 Variation of ground water depth in Shenmu county

部滩地区, 地下水位埋深浅, 地下水埋深主要受降水等影响, 多年来呈波动式变化。东北部煤矿集中区, 区域地下水位下降比较明显。

4.2 生态系统尚不稳定, 依然十分脆弱

遥感监测发现, 榆林市主要土地利用类型为草地, 占到全区的 48.2%, 其中低、中、高覆盖度草地分别占 20.7%、18.0% 和 9.5%。林地占比较小, 仅占到全区的 9.5%(图 7)。

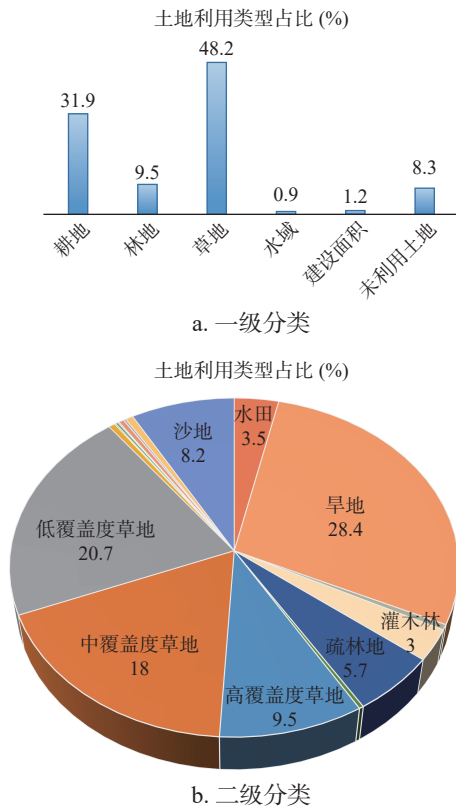


图7 榆林市土地利用类型统计图

Fig. 7 Statistical chart of land use in Yulin city

研究发现, 20 世纪 60、70 年代营造的以杨树为主的防护林, 已老化退化濒临死亡, 飞播灌丛植被经过 30 年左右的生长, 进入过熟期。20 世纪 60 年代开始引种的樟子松, 是防沙治沙的最主要乔木造林树种, 多年来形成了“一树独大”的局面(赵国平等, 2018)。虽然在造林时多营造的是樟子松与紫穗槐等灌木的乔灌混交林, 但随着郁闭度提高, 灌木逐步死亡, 混交林演变成樟子松纯林, 存在巨大的生态安全隐患(武烽东等, 2004)。

4.3 近年来土地利用方式和耕作方式出现了新的变化

榆林市自 2011 年以来在西北部毛乌素沙地开采了大量的耕地, 利用最新的遥感影像圈定计算得出约 250 km²(图 8), 实际上因遥感影像精度及解译精度的

问题, 其他学者报道的实际数字远大于该数字, 达 333~520 km²(郭瑾瑞等, 2020)。耕地开垦使得榆林市连年实现耕地保有量稳中有增, 耕地质量不断提高的良好成效, 并为保障全省重点建设项目补充耕地做出了重大贡献。

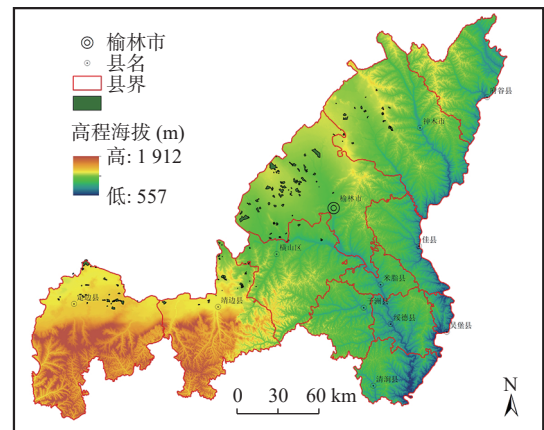


图8 榆林市毛乌素沙地新增耕地分布图

Fig. 8 New cultivated land in Mu Us Sandy Land in Yulin

但是, 目前毛乌素沙地的开发的耕地多用于种植耗水量较大的土豆和玉米等, 要满足灌溉需要, 只有富水性强、补给量充足的地区才能得到有效保障。大规模开发地下水如不能及时补给, 就会导致地下水位的下降。因此, 大规模水浇地的整治开发, 会增加地下水的消耗, 如开发不当, 会影响毛乌素沙地的生态环境(石辉等, 2019)。此外, 整理开发的土地冬春季大面积裸露, 加之秋收后的翻耕, 极易引起扬沙。

4.4 湖泊(海子)水面减小, 河川径流量减少

遥感解译得出, 2000~2018 年, 湖泊和水库坑塘面积呈现减少趋势, 由 128.68 km² 减少至 116.22 km², 但 2018 年较 2010 年呈现出增加的趋势。2000~2010 年, 湖泊和水库坑塘面积减少的较明显, 由 128.68 km² 下降至 105.85 km²。此外, 大量的监测数据也发现, 近 50 年以来榆林市较大的河流窟野河、秃尾河和无定河河流流量呈现出递减趋势(图 9)。

湖泊湿地萎缩、各大河流径流量减少与气象要素和人类工程活动等有关(张健等, 2016)。不同学者采用不同的方法对红碱淖的面积进行了监测, 发现红碱淖的水面面积总体上呈现减少趋势, 气候暖干化加上人类工程活动, 如水利工程建设、煤矿开采、灌溉等, 是造成湖泊面积萎缩的关键因素。近年来, 通过人工补水等措施, 湖泊萎缩的趋势出现逆转(尹立河等, 2008; 杨立彬等, 2014; 王莺等, 2018; 江维等, 2018; 卓

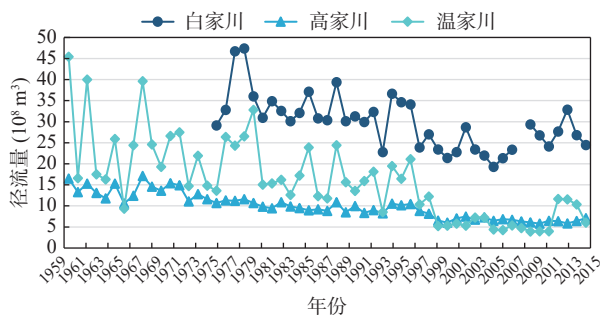


图9 无定河(白家川站)、秃尾河(高家川站)、窟野河(温家川站)干流径流量多年变化图

Fig. 9 Variation of annual runoff of Wuding River (in the station of Baijiachuan), Tuwei River (in the station of Gaojiachuan) and Kuye River (in the station of Wenjiachuan)

静等, 2019; 马红利等, 2020; 谢治国等, 2021; 姬莉雯等, 2023)。

资料显示, 榆林市 22 个水文站的径流均呈现减少趋势, 主要受区域用水量增加和降雨量减少的影响(曹巍等, 2019)。就无定河流域来说, 人类工程活动是黄土丘陵沟壑区和风沙区径流量与输沙量减少的主要因素; 人类工程活动对风沙区的减沙和减水效益分别为 81.43% 和 21.74%; 对黄土丘陵沟壑区的减沙和减水效益分别为 58.46% 和 27.12%(杨媛媛等, 2017)。2000 年以前, 气象要素是影响毛乌素沙地湖泊面积变化的主要因素, 2000 年以后, 湖泊面积变化主要受人类工程活动的影响(徐丹蕾等, 2019)。1960~2012 年, 无定河流域不同地貌类型区的支流, 如海流兔河和大理河年径流量均呈现明显下降的趋势。在黄土丘陵沟壑区, 大规模建设的水土保持措施, 尤其是淤地坝等的建设是大理河径流量在 1971 年左右减少的重要原因。而北部风沙区, 大规模水利工程的建设和农业灌溉用水的增加是导致海流兔河径流量变化的主要原因(任宗萍等, 2019)。

5 对策建议

水是榆林市生态环境保护和高质量发展的关键因素(马裕德等, 2011; 张茂省等, 2014; Wang et al., 2021; 党学亚等, 2022), 因此解决好水资源的优化配置及宏观调控是解决资源环境矛盾的根本。为此, 建议在以下几个方面加强研究和监控。

5.1 加强水资源开发优化配置

2020 年全市总用水量 11.21 亿 m^3 , 农业用水量为 6.95 亿 m^3 , 占总用水量的 62.0%; 工业用水量为

2.82 亿 m^3 , 占总用水量的 25.2%; 居民生活用水量为 0.97 亿 m^3 , 占总用水量的 8.6%; 城镇公共用水量为 0.34 亿 m^3 , 占总用水量的 3.0%; 生态环境用水量为 0.13 亿 m^3 , 占总用水量的 1.2%(榆林市水利局, 2020)。总体来说, 近 20 年榆林市的水资源用量中, 农业、工业和生活用水占的比例较高, 而生态用水所占比例较低。建议考虑区内的地表水、地下水和矿坑疏排水以及可预见期限内能够完成的黄河引水, 平衡生态、生活及工农业用水之间的关系, 优化工农业经济产业布局, 获取最大的经济社会效益。

此外, 需加大矿井水利用的强度和黄河引水工程的建设力度。榆林市涌水量较大的煤矿主要分布在榆阳区和神木市, 矿井水利用潜力较大。目前矿井水利用存在的主要问题是, 矿井水量大的区域和地下水资源量丰富的区域是重复的, 导致资源无法有效利用。鉴于此, 部分企业因矿井涌水量较大, 超出当时设计处理能力, 导致矿井水处理能力不足, 直接外排或储存在蓄水池, 造成了资源浪费。因此, 建议加强矿井水利用的强度和区域调控。

榆林市水资源相对有限, 随着能源资源开发力度的快速增加和社会经济的飞速发展, 当地水资源难以支撑榆林市经济社会的可持续发展。因此, 建设引黄工程对榆林市经济社会全局和长远发展具有重要战略意义。

5.2 需充分考虑水资源承载力, 限制高耗水的树种

自黄土高原 1999 年开始退耕还林以来, 陕北榆林地区的降水呈逐年增加的趋势, 同时蒸(散)发也呈增加趋势, 土壤水分则呈减少趋势。野外调查结果发现, 土壤水分具有垂直变化的特点, 主要表现为表层较干, 土壤含水层随深度增加有增大的趋势, 但通常 1 m 左右以下土壤含水量较为稳定。2019 年土壤含水量调查结果显示, 大部分样方点土壤含水量变化范围较为集中, 约为 0.5%~3.5%, 相对干燥, 这与植物过度消耗土壤水具有密切关系。已有研究同样表明, 黄土高原部分乔灌木在造林 5~8 年后, 存在部分纯林生长不良, 呈现衰退的趋势, “土壤干层”现象严重等问题(Jia et al., 2015; Huang et al., 2019; Bai et al., 2021)。

从不同类型植被的蒸散耗水特征来看, 林地耗水量大于草地, 草地大于稀疏灌丛。榆林地区的多年年均降水量约为 365 mm, 但在空间上存在差异性, 其中东南部降水偏多, 而西部偏低。当前, 结合榆林地区降水条件, 植被恢复应该以灌草为主。通过优化调整

人工造林树种组成来降低水资源消耗, 限制高耗水树种如新疆杨、白榆、樟子松、油松、刺槐和侧柏等乔木林的比例, 增加符合当地水热条件的天然树种(如柠条、沙蒿、沙棘)的比例。此外, 还可结合土壤水分承载力的测算, 参考低覆盖造林治沙理念, 通过造林密度的调控实现人工林结构与功能的稳定持续, 做到适地适树。

造林树种的确定还需兼顾“因害设防”的问题。榆林地区是风蚀、水蚀交错区, 在造林树种选择时要综合考虑植物的防风固沙与水土保持功能。不同类型的植物生态功能各异。乔木树种固然耗水量高, 但是具有较强的阻风能力, 农田防护林的树种多采用杨树、樟子松以及榆树等。

5.3 从生态功能保护的角度需降低榆林毛乌素沙地土地开发强度, 加强生态空间转用监测评估

毛乌素沙地是防风固沙生态功能区, 大区上属于鄂尔多斯高原防风固沙重要区。该区域属内陆半干旱气候区, 主要发育以沙生植被为主的草原植被类型, 土地沙化敏感性程度极高, 是中国防风固沙重要区域。区内主要的生态环境问题是人类对草地资源的过度利用, 矿产资源开发导致草地生态系统严重退化, 草地生物量和生产力不断下降、土地沙化程度加重, 对当地乃至周边地区居民生产生活带来危害。主要生态保护措施是: 建立以“带、片、网”相结合的防风固沙体系, 建立能有效保护耕地的农田防护体系, 加强对流动沙丘的固定和治理, 改变粗放的生产经营方式, 停止一切过度消耗地表水、超采地下水等会导致生态功能继续恶化的人为活动, 加强矿产资源开发的生态恢复治理力度(环境保护部, 2015)。

但目前的土地整治开发活动与毛乌素沙地的生态功能相悖。因此, 建议降低毛乌素沙地土地开发强度, 加大土地整治的力度, 应首先考虑提高现有土地的质量。同时, 在土地整治开发过程中, 需考虑土地整治与沙化控制, 农业生产与水资源安全保障, 开发土地内、外部风蚀等问题和影响(石辉等, 2019)。此外, 加强区域地下水位和沙化监测, 防止“二次沙化”出现。加强水、土资源承载力等研究, 探索毛乌素沙地转用耕地的用途管制规则。

6 结论

(1)近20年以来, 陕北榆林地区植被覆盖度近年

来呈明显增加的趋势; 林草地呈明显的增加趋势, 未利用地明显减少; 荒漠化程度明显减轻, 尤其是沙质荒漠化土地显著减少。

(2)近年来河流流量减少、区域地下水位下降、生态系统不稳定、土地利用方式等的改变可能会引起新的生态环境问题。

(3)建议加强水资源的宏观调控和监测评价, 生态修复过程中需充分考虑水土资源承载力, 生态空间转用需根据主体生态功能加强准入和转用监测。

致谢: “陕北榆林荒漠化区综合地质调查与评价”项目组的于国强、崔旭东、赵振宏、张乐中、刘洁、王龙莺、魏兴丽、付东萍参与了野外调查工作, 中国科学院地理与资源研究所的王平老师, 西安理工大学的时鹏老师, 黄河水利科学研究院申震洲老师, 陕西省治沙研究所的石长春老师提供了部分数据, 在此一并感谢。

参考文献(References):

- 曹巍, 张洪波, 任冲锋, 等. 陕北榆林地区河川径流变异类型的识别方法[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 138-154.
- CAO Wei, ZHANG Hongbo, REN Chongfeng, et al. Identification of hydrological variation types in river streamflow series in Yulin, northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019, 47(3): 138-154.
- 党学亚, 张俊, 常亮, 等. 西北地区水文地质调查与水资源安全[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 81-95.
- DANG Xueya, ZHANG Jun, CHANG Liang, et al. Hydrogeological Survey and Water Resources Security in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 81-95.
- 范立民, 向茂西, 彭捷, 等. 毛乌素沙漠与黄土高原接壤区泉的演化分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 207-218.
- FAN Limin, XIANG Maoxi, PENG Jie, et al. Evolution analysis on springs in contiguous area of Maowusu Desert and Loess Plateau[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 207-218.
- 封建民, 文琦, 郭玲霞. 风沙过渡区土地利用变化对生态系统服务价值的影响—以榆林市为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 304-308.
- FENG Jianmin, WEN Qi, GUO Lingxia. Effects of Land Use Change on the Ecosystem Service Value in Ecotone of Wind and Sand—A Case Study in Yulin City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 304-308.

- 冯立, 张鹏飞, 张茂省, 等. 新时期榆林煤矿区生态保护修复与综合治理策略及路径探索[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 19–29.
- FENG Li, ZHANG Pengfei, ZHANG Maosheng, et al. Strategies and Practical Paths for Ecological Restoration and Comprehensive Management in Yulin Coal Mining Area in the New Era[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 19–29.
- 郭瑾瑞, 王乐, 郁科科, 等. 近 30 年榆林市城镇化与耕地资源协调性研究[J]. *宝鸡文理学院学报 (自然科学版)*, 2020, 40(3): 77–82.
- GUO Jinrui, WANG Le, YU Keke, et al. The coordination between urbanization and cultivated land in Yulin City during the past 30 years[J]. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science)*, 2020, 40(3): 77–82.
- 环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划 (修编版)[R]. 2015.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Chinese Academy of Science. National Ecological Function Zoning (Revised Edition)[R]. 2015.
- 姬莉雯, 王增武, 崔林林, 等. 近 30 年红碱淖水体时空动态变化遥感监测研究[J]. *陕西气象*, 2023, 1: 41–49.
- JI Liwen, WANG Zengwu, CUI Linlin, et al. Study on Dynamic Changes of Hongjiannao Based on Remote Sensing in last 30 years[J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2023, 1: 41–49.
- 江维, 李英杰, 邓彦, 等. 红碱淖水面面积演变及其原因[J]. *人民黄河*, 2018, 40(4): 72–75.
- JIANG Wei, LI Yingjie, DENG Yan, et al. Water Area Changing of Hongjiannao Lake and Its Reasons[J]. *Yellow River*, 2018, 40(4): 72–75.
- 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(3): 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(3): 108–119.
- 李亚丽, 杨粉莉, 杨联安, 等. 近 40a 榆林市土地利用空间格局变化及影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(4): 1011–1021.
- LI Yali, YANG Fenli, YANG Lian'an, et al. Spatial pattern changes and influencing factors of land use in Yulin City in the past 40 years[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(4): 1011–1021.
- 李智佩, 岳乐平, 聂浩刚, 等. 中国三北地区荒漠化区域分类与发展趋势综合研究[J]. *西北地质*, 2002, 35(4): 135–153.
- LI Zhipei, YUE Leping, NIE Haogang, et al. Regional classification and developing trend of desertification in Northern China[J]. *Northwestern Geology*, 2002, 35(4): 135–153.
- 栾金凯, 刘登峰, 黄强, 等. 近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2780–2790.
- LUAN Jinkai, LIU Dengfeng, HUANG Qiang, et al. Analysis of the spatial-temporal change and impact factors of the vegetation index in Yulin, Shaanxi Province, in the last 17 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2780–2790.
- 马红利, 白穆, 郭勇. 1957—2019 年红碱淖时空演变过程及其成因分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(12): 143–146.
- MA Hongli, BAI Mu, GUO Yong. Analysis on the Space-time Evolvement Process and Cause of Hongjiannao during 1957 and 2019[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(12): 143–146.
- 马裕德, 帅启富, 刘榆平, 等. 关于破解榆林能源化工基地水资源瓶颈的探讨[J]. *水利发展研究*, 2011, 2: 62–66.
- MA Yude, SHUAI Qifu, LIU Yuping, et al. Discussion on Breaking Water Resources Bottleneck of Yulin Energy and Chemical Industry Base[J]. *Water Resources Development Research*, 2011, 2: 62–66.
- 聂浩刚, 王岷, 孙虎, 等. 近 10 年来沙漠-黄土边界带荒漠化土地动态分析——以陕北榆林地区为例[J]. *西北地质*, 2005, 38(2): 86–93.
- NIE Haogang, WANG Min, SUN Hu, et al. Dynamic analysis on changes of desertification in desert-loess boundary belt during the last 10 years—A case study on Yulin area in North Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(2): 86–93.
- 任宗萍, 马勇勇, 王友胜, 等. 无定河流域不同地貌区径流变化归因分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4309–4318.
- REN Zongping, MA Yongyong, WANG Yousheng, et al. Runoff changes and attribution analysis in tributaries of different geomorphic regions in Wuding River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4309–4318.
- 石辉, 刘秀花, 陈占飞, 等. 陕北榆林毛乌素沙地大规模土地整治开发的生态环境问题及其对策[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2228–2235.
- SHI Hui, LIU Xiuhua, CHEN Zhanfei, et al. Eco-environmental problems and their solution strategy for large-scale land consolidation and development in Mu Us Sandy Land of Yulin in North Shaanxi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7): 2228–2235.
- 石玉琼, 郑亚云, 李团胜. 榆林地区 2000—2014 年 NDVI 时空变化[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 211–218.
- SHI Yuqiong, ZHENG Yayun, LI Tuansheng, et al. The spatiotemporal change of NDVI in Yulin, Shaanxi Province, China from 2000 to 2014[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1): 211–218.

- 陶虹, 宁奎斌, 陶福平, 等. 陕北典型风沙滩地区浅层地下水动态特征及对煤炭开采响应分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2319–2325.
- TAO Hong, NING Kuibin, TAO Fuping, et al. Shallow groundwater dynamic characteristics and response to coal mining in the typical blownsand region of the Northern Shaanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2319–2325.
- 王枫, 陈幸良. 黄河“几”字湾(榆林)林草生态保护修复主要问题及对策[J]. 林草政策研究, 2021, 1(1): 76–80.
- WANG Feng, CHEN Xingliang. Main Problems and Countermeasures of Ecological Conservation and Restoration of Forest and Grass in J-shaped bend (Yulin) of the Yellow River[J]. Journal of Forestry and Grassland Policy, 2021, 1(1): 76–80.
- 王涛, 杨梅焕. 榆林地区植被指数动态变化及其对气候和人类活动的响应[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1133–1140.
- WANG Tao, YANG Meihuan. Dynamic Change of NDVI and Its Response to Climate Change and Human Activities in Yulin, Shaanxi Province, China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1133–1140.
- 王莺, 闫正龙, 高凡. 1957—2015年红碱淖湖水域面积时空变化监测及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 265–271.
- WANG Ying, YAN Zhenglong, GAO Fan. Monitoring spatio-temporal changes of water area in Hongjiannao Lake from 1957 to 2015[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 265–271.
- 蔚霖, 常庆瑞, 孟庆香. 风蚀水蚀过渡区近20年土地利用/覆被动态分析—以横山县为例[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 212–218.
- YU Lin, CHANG Qingrui, MENG Qingxiang. Study on land use/cover change of wind-water erosion region in recent two decades—Taking Hengshan as an example[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2009, 37(11): 212–218.
- 武烽东, 贾瑞燕, 肖玉保, 等. 陕北生态修复现状与对策—以榆林地区为例[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 98–101.
- WU Fengdong, JIA Ruiyan, XIAO Yubao, et al. Present Condition and Countermeasures of Eco-restoration in Northern Shaanxi: A Case Study of Yulin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(4): 98–101.
- 谢治国, 连迎馨, 吴惠萍, 等. 2000—2018年红碱淖湿地水面积变化及其保护对策[J]. 陕西林业科技, 2021, 49(4): 33–38.
- XIE Zhiguo, LIAN Yingxin, WU Huiping, et al. Water Area Change of Hongjiannao Wetland from 2000 to 2018 and Related Policies[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2021, 49(4): 33–38.
- 徐丹蕾, 丁靖南, 伍永秋. 1989—2014年毛乌素沙地湖泊面积[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 40–47.
- XU Danlei, DING Jingnan, WU Yongqiu. Lake Area Change in the Mu Us Desert in 1989–2014[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(6): 40–47.
- 徐友宁, 张江华, 何芳, 等. 西北地区矿山地质环境调查与防治研究[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 129–139.
- XU Youning, ZHANG Jianghua, HE Fang, et al. Investigation and Preventive Research of Mine Geological Environment in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 129–139.
- 杨波, 王全九, 许晓婷, 等. 还林还草工程后榆林市NDVI时空变化趋势[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1839–1848.
- YANG Bo, WANG Quanjiu, XU Xiaoting, et al. NDVI spatiotemporal variation in Yulin after grain for green project[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1839–1848.
- 杨立彬, 黄强, 武见, 等. 红碱淖湖泊面积变化影响因素及预测分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 74–78.
- YANG Libin, HUANG Qiang, WU Jian, et al. Influence factors and prediction on area change of lake Hongjiannao[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(3): 74–78.
- 杨强, 王涛. 榆林地区土地利用/覆盖时空变化及其对生态脆弱性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 79–83.
- YANG Qiang, WANG Tao. Spatial-temporal variation of land use/cover and the analysis of its effect on ecological vulnerability in Yulin City of Shaanxi Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(2): 79–83.
- 杨媛媛, 李占斌, 任宗萍, 等. 人类活动对无定河流域不同地貌区水沙变化的影响[J]. 泥沙研究, 2017, 42(5): 50–56.
- YANG Yuanyuan, LI Zhanbin, REN Zongping, et al. The influence of human activities on the changes of water and sediment in different landforms[J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(5): 50–56.
- 杨忠信. 榆林治沙(1949–2017)[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社. 2018.
- YANG Zhongxin. Yulin sand control(1949–2017)[M]. Yangling: Northwest A&F University Press, 2018.
- 叶璇, 康帅直, 赵永华, 等. 陕北黄土高原植被恢复与生态系统服务的时空关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2760–2768.
- YE Xuan, KANG Shuaizhi, ZHAO Yonghua, et al. Spatio-temporal relationship between vegetation restoration and ecosystem services in the Loess Plateau of Northern Shaanxi, China[J].

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2760–2768.
- 尹立河, 张茂省, 董佳秋. 基于遥感的毛乌素沙地红碱淖面积变化趋势及其影响因素分析[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1151–1156.
- YIN Lihe, ZHANG Maosheng, DONG Jiaqiu. Area variation and controlling factors of Lake Hongjian, Mu Us desert, China based on remote sensing techniques[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1151–1156.
- 榆林市水利局. 榆林市水资源公报[R]. 2020.
- 张凡, 田旭荣, 薛彤, 等. 榆林市生态系统固碳价值对林地系统结构的响应变化[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 51–57.
- ZHANG Fan, TIAN Xurong, XUE Tong, et al. Response of Ecosystem Carbon Fixation Value to Forest System Structure in Yulin City[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 51–57.
- 张健, 李同昇, 张俊辉, 等. 1933~2012 年无定河径流突变与周期特征诊断[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 475–480.
- ZHANG Jian, LI Tongsheng, ZHANG Junhui et al. The Runoff Abrupt Change and Periodic Characteristics of the Wudinghe River During 1933-2012[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(3): 475–480.
- 张茂省, 党学亚. 干旱半干旱地区水资源及其环境问题—陕北榆林能源化工基地例析[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- ZHANG Maosheng, DANG Xueya. Water resources and environmental problems in arid and semi-arid areas —A case study of Yulin energy and chemical base in northern Shaanxi[M]. Beijing: China Science Publishing&Media Ltd., 2014.
- 赵国平, 高荣, 朱建军, 等. 榆林市六十年治沙研究与实践[J]. 陕西林业科技, 2018, 46(6): 42–47.
- ZHAO Guoping, GAO Rong, ZHU Jianjun, et al. Summary of 60 Years' Research and Practice on Sand Control in Yulin[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2018, 46(6): 42–47.
- 卓静, 朱延年, 王娟, 等. 红碱淖面积时空演变规律及保护措施成效[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 195–203.
- ZHUO Jing, ZHU Yannian, WANG Juan, et al. Spatio-temporal Change of Water Area in Hongjiannao Lake and the Effectiveness of Protection Measures[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 195–203.
- Bai X, Jia X X, Zhao C L, et al. Artificial forest conversion into grassland alleviates deep-soil desiccation in typical grass zone on China's Loess Plateau: Regional modeling[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2021, 320: 107608.
- Gu L, Gong Z W, Du Y X. Evolution characteristics and simulation prediction of forest and grass landscape fragmentation based on the "Grain for Green" projects on the Loess Plateau, P. R. China[J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108240.
- Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 199: 102962.
- Jia X X, Shao M A, Zhang C C, et al. Regional temporal persistence of dried soil layer along south–north transect of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 152–160.
- Kou P L, Xu Q, Jin Z, et al. Complex anthropogenic interaction on vegetation greening in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021, 778: 146065.
- Luo M Y, Li T S. Spatial and temporal analysis of landscape ecological quality in Yulin[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 23: 101700.
- Wang K B, Deng L, Shangguan Z P, et al. Sustainability of eco-environment in semi-arid regions: Lessons from the Chinese Loess Plateau[J]. Environmental Science and Policy, 2021, 125: 126–134.