

DOI: 10.5846/stxb201606021068

张虹, 张代钧, 卢培利. 涪陵焦石坝页岩气开采区土地损毁的生态风险评价. 生态学报, 2017, 37(17): 5807-5817.

Zhang H, Zhang D J, Lu P L. Ecological risk assessment of land destruction by shale gas development at Fuling Jiaoshiba, China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5807-5817.

涪陵焦石坝页岩气开采区土地损毁的生态风险评价

张 虹^{1,2,3}, 张代钧^{1,*}, 卢培利¹

1 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044

2 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

3 三峡库区地表过程与环境遥感重点实验室, 重庆 401331

摘要:页岩气在勘探、开采、集输过程中对周边生态系统会产生直接或间接影响。通过构建页岩气开采土地损毁生态风险因果链识别井场、运输道路及集输管线等风险源,基于最小阻力模型定量分析土地损毁的生态累积影响;选取了植被覆盖度、生态服务价值及土壤肥力等因子表征区域生态重要性,土壤侵蚀度、石漠化敏感性及水环境敏感性等表征生态脆弱性,综合评价区域生态敏感度,并以此作为风险受体,实现涪陵焦石坝页岩气开发区的生态风险评价。2012—2015 年末,涪陵焦石坝页岩气产建区钻井数量快速增加,分布广,页岩气开发对区域生态累积影响扩大。2015 年末,区域一半以上面积为中、高生态风险区(146.56 km², 55.8%),主要分布于南部乌江河谷及北部低山区,前者水环境敏感度高,后者岩溶发育度高,土壤侵蚀度高,石漠化敏感;该区域内大规模页岩气开发将面临水环境污染、生境破坏、土壤退化、石漠化加重及生物多样性减少等生态风险,是生态环境管理及风险防范的重点方面。研究结果可为区域生态安全建设提供科学的参考。

关键词:页岩气开发;土地损毁;生态敏感度;生态风险;涪陵焦石坝

Ecological risk assessment of land destruction by shale gas development at Fuling Jiaoshiba, China

ZHANG Hong^{1,2,3}, ZHANG DaiJun^{1,*}, LU Peili¹

1 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing 400044, China

2 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

3 Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region Surface Processes and Environment Remote Sensing, Chongqing 401331, China

Abstract: Regional ecosystems can be impacted, directly or indirectly, by exploration, extraction, collection, and transportation of shale gas. By establishing an ecological risk cause-effect chain based on land destruction caused by shale gas development at Fuling Jiaoshiba, China, well sites, transportation roads, and pipe lines were identified as risk sources. On the basis of a minimum resistance model, the cumulative ecological impacts of land destruction were quantitatively analyzed. Vegetation coverage, ecosystem service value, and soil fertility were then selected as the characteristics of important ecological value, and soil erosion, stony desertification sensitivity, and aquatic environment sensitivity were selected as indices of ecological vulnerability. By synthesizing important ecological value and ecological vulnerability indices, the regional ecological sensitivity was evaluated. By combining the cumulative ecological impacts with regional ecological sensitivity, an assessment of regional ecological risk was carried out. In the period 2012 to 2015, there were a large number of shale gas drilling wells scattered across the Fuling Jiaoshiba region at Chongqing, China, and the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41501582);2015 年度国家环境技术管理项目(2110109);重庆教委人文社会科学项目(12SKE07);重庆市环保局科技项目(2014-0120);煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室科研基金项目(2011DA105287-ZD201505)

收稿日期:2016-06-02; 网络出版日期:2017-04-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dzhang@cqu.edu.cn

cumulative ecological impact of shale gas development was very significant. By the end of 2015, more than half of the region was classified as areas of middle or high ecological risk (146.56 km², 55.8%). These areas were mainly located in the southern Wujiang River Valley and the northern low mountain region. The southern Wujiang River Valley is a highly sensitive aquatic environment, whereas the northern low mountain region is highly sensitive to soil erosion and Karst rocky desertification. With the progression of shale gas development, the region will be exposed to water pollution, habitat destruction, soil degradation, aggravated rocky desertification, loss of biodiversity, and other ecological risks, which are key aspects of ecological environment management and risk prevention. These results provide references for development of ecological security measures for shale gas development at Fuling Jiaoshiha, China.

Key Words: shale gas development; land destruction; ecological sensitivity; ecological risk; Fuling Jiaoshiha

页岩气是指赋存于有生烃能力的泥岩及页岩中,以吸附及游离状态存在的非常规天然气,具有自生自储、吸附成藏、隐蔽聚集等地质特点^[1-2]。目前,水平钻井及水力压裂是页岩气开采的核心技术,由此带来众多环境问题,并逐步受到国内外学者关注,主要集中在页岩气开采的大量耗水、水环境污染、甲烷释放等方面^[3-4]。同时,页岩气开采土地占用量大,地表扰动强度高,一方面井场、道路及集输管线等基础设施建设需要大量用地,另一方面,页岩气钻井密度大,约1口/km²,是常规天然气钻井密度的10倍。短期内剧烈的人为地表扰动,使得区域面临土壤污染、地表侵蚀、植被破坏、景观破碎、局部生态失衡等潜在生态风险^[5-7],而生态风险评价则可定量预测页岩气开采对区域生态系统产生风险的可能性,并评估该风险的可接受程度,是区域生态环境管理及风险防范的重要依据^[8]。

目前,生态风险评价已成为生态系统综合评估的关键问题和宏观生态学的热点研究方向之一^[9]。从单因子、小尺度^[4-5]的生态风险评价发展到区域性、大尺度、多因子的综合评价^[10-11];风险受体从人体健康发展到种群群落^[12]、生态系统^[13-14]及景观格局^[15-16];评价过程也逐步完善,含受体分析、风险源分析、暴露与危害分析及风险综合评价^[17];应用领域众多,如工业、农业、矿产、旅游等^[18-21]。

中国南方海相页岩发育区是迄今评价认为最有前景的页岩气区,区域水资源相对丰富,也是中国页岩气优先开采区。但区域地少人多,地貌以丘陵、山地为主,降雨充沛,水土流失严重,局部岩溶发育强烈,石漠化程度高,生态环境脆弱敏感。与其他国家地广人稀的平原开采区相比,该地区生态环境更易受人类活动的影响,短期内大规模页岩气开采,使得区域生态系统稳定性进一步下降,生态安全受到一定威胁^[22]。目前,页岩气开采的生态环境问题研究仍以定性为主,仅少量定量评价^[6-7,23],但从风险源、风险受体及其相互作用的综合生态风险评价尚未看到,使得区域生态环境管理缺乏针对性,一定程度上降低了生态风险防范的有效性。

为此,本文以涪陵焦石坝页岩气产建区为例,借助遥感影像,结合区域实地调研资料,通过因果链模型,分析页岩气开采区生态系统的破坏方式,以井场、运输道路、集输管线等工程占地土地损毁作为风险源,以生态敏感度为风险受体,实现区域生态风险的定量评价和空间差异可视化,并对比2012年页岩气开采初期与2015年末的区域生态风险,进一步认识页岩气开采的生态风险异质格局及时空演变特征,为区域生态环境管理及生态安全格局构建提供科学的参考,以期页岩气开采区的生态风险空间防范提供借鉴。

1 研究区与数据

研究区位于四川盆地东南边缘重庆市中部,介于107°24'—107°37'E,29°31'—29°46'N之间,面积262.8 km²。地势北高南低,海拔130—830m。地质构造属川东高陡褶皱带包鸾—焦石坝背斜带焦石坝构造,地层产状平缓,断层不发育,有利于大规模页岩气开采。区域为典型的喀斯特地貌,土地利用以耕地为主,林地次之,植被类型有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、柏木(*Cupressus funebris* Endl)、青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)等;土壤类型以石灰土为主,占区域面积的65.43%;区域嘉陵江组(T_{1j})、雷口坡组(T_{2l})等碳酸盐岩裸露,岩溶发育强烈,地下水丰富,局部地区水土流失严重,属土壤侵蚀及石漠化高度敏感

区;另外,乌江纵穿区域,磨溪河、后溪河等支流水系纵横,地下水埋藏浅(<50m),水环境敏感。研究区气藏地层为志留系龙马溪组,区内动用储量 $1694.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,2012—2015年,共建63个平台253口井,单井平均井深4600m,2015年末产能 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$,工程占地面积 14.39 km^2 ,占研究区面积的5.5%。

研究所需主要数据:2011年10月23日 landsat5 TM,2015年10月21日的 landsat8 OLI 影像127/39幅(来源于中国科学院地理空间数据云);土地分类及风险源识别辅助数据 Google earth 高分影像(精度2.39m);2012年、2015年土壤侵蚀图(1:5万)(来源于重庆市林业局);DEM(30m),土壤类型图(1:5万),涪陵区土壤志(来源于重庆市水利局)及涪陵焦石坝页岩气产建区相关资料。为了便于运算,所有空间数据采用 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 栅格单元,并统一转换成高斯克吕格投影。

2 研究方法

2.1 土地损毁的生态风险因果链

页岩气钻前勘探、钻井、压裂试气、采气集输等整个开发过程,都会对区域生态系统产生直接和间接的危害或影响,作用过程复杂,包括:(1)钻前井场平整,新建井口、废水池、压裂水池、放喷池、道路,设备运输安装等活动引起的地表植被破坏,生境退化,土地利用方式改变,水土流失等;(2)井场作业过程中产生含酸性、碱性、毒性或重金属等成分的废水、固体废弃物的潜在污染,噪声污染、光污染等;(3)输气管线、集气站及阀室等建设的临时性占地及永久占地,致使区域地表植被损毁,土壤的理化性质改变,农业、林业生态系统等受到影响,动植物减少等。页岩气开采过程是区域生态风险的施加者,土地损毁是风险的直接来源,区域生态系统则是风险承受者,在此基础上,将风险诱因、风险源、风险受体和作用后果间的相互关系以因果链的形式表征,构建以页岩气开采过程为纽带的因果链模型(图1)。

2.2 生态风险评价方法

页岩气开采过程中,人类活动越频繁,地表扰动越大,生态环境影响越大;另外,区域生态系统越脆弱,抵抗外界影响及自身生态恢复能力越弱,生态风险越大。故以研究区页岩气开采土地损毁的累积影响及生态系统敏感度两个方面构建生态风险评估模型。

2.2.1 综合生态风险评估

综合生态风险值 ERV(ecological risk value)是区域生态风险大小的定量表征,它是各类土地损毁扰动过程综合作用于生态系统的结果,可通过土地损毁生态累积影响系数 CEI(cumulative effect index)和生态敏感度 ESI(ecological sensitivity index)进行度量。计算方法如下:

$$ERV_i = CEI_i \times ESI_i \quad (1)$$

其中, ERV_i 是研究区第 i 个评价单元的综合生态风险值; CEI_i 是第 i 个评价单元的累积影响系数; ESI_i 是第 i 个评价单元的生态敏感度值; i 为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的栅格单元。

2.2.2 土地损毁累积影响程度

土地损毁累积影响系数(CEI)用于表征页岩气开采过程中不同类型土地损毁对生态系统的作用大小,采用土地损毁扰动强度^[17](β)及其对外扩散耗费系数^[20](SCC)进行量化,值越高,土地损毁的累积危害越大。计算方法如下:

$$CEI_i = \beta_i \times (1 - SCC_i) \quad (2)$$

式中, CEI_i 第 i 个评价单元的土地损毁累积影响系数, β_i 第 i 个评价单元的土地损毁扰动强度, SCC_i 土地损毁扰动强度对第 i 个评价单元的扩散耗费系数。

土地损毁扰动强度 β 是通过选取不同风险表征因子,结合区域实际情况,采用因子对比法及序关系法^[24],判别各因子的风险贡献率,计算不同类型土地损毁生态影响程度。具体步骤如下:

(1)根据各类土地损毁可能造成的潜在风险,建立风险因子集合 R 并排序, $R = \{\text{大量耗水、水污染、水土流失、生境破坏/退化、石漠化、生物多样性减少、土壤污染/退化、甲烷泄露、扬尘污染、噪声污染、光污染、放射}$

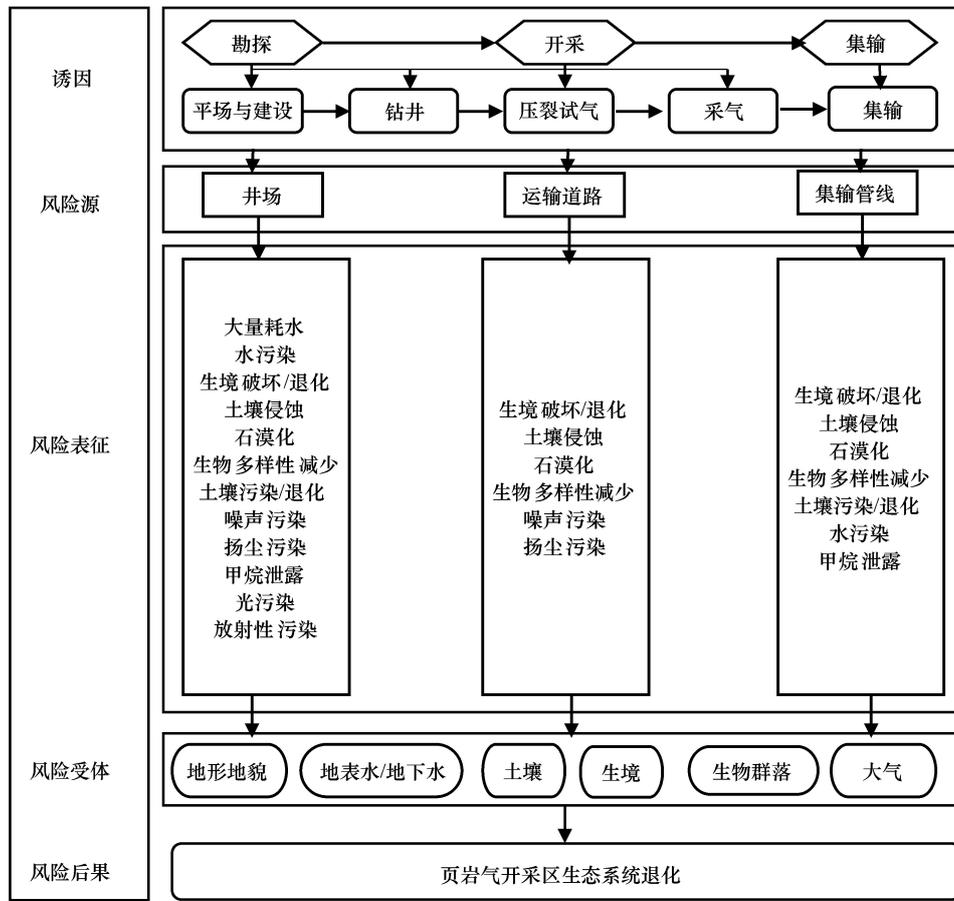


图 1 页岩气开采土地损毁的生态风险因果链

Fig.1 The ecological risk cause-effect chain of land destruction in shale gas development

性污染}；

(2) 确定因子重要性标度, 即相邻评价指标 x_{k-1} 与 x_k 的重要程度之比 r_k , 1.8-极重要, 1.6-重要, 1.4-较重要, 1.2-稍重要, 1-同等重要, 1.7, 1.5, 1.3 为中间值, 第 12 个指标权重 $w_{12} = (1 + \sum_{i=2}^{12} \prod_{j=i}^{12} r_j)^{-1}$, 各指标权重 $w_{k-1} = r_k \times w_k$ [24] (表 1)。

表 1 涪陵焦石坝页岩气产建区土地损毁风险表征因子权重

Table 1 The weights of ecological risk factor for the land destruction of shale gas development at Fuling Jiaoshiba

风险表征因子 Risk factor	权重 Weight	风险表征因子 Risk factor	权重 Weight	风险表征因子 Risk factor	权重 Weight
大量耗水	0.214	石漠化	0.091	扬尘污染	0.037
水污染	0.167	生物多样性减少	0.083	噪声污染	0.031
水土流失	0.125	土壤污染/退化	0.069	光污染	0.021
生境破坏/退化	0.102	甲烷泄露	0.041	放射性污染	0.019

(3) 各类土地损毁及生产环节会产生不同潜在风险, 根据风险表征因子权重, 计算每类土地损毁扰动程度, 公式如下:

$$\beta_j = \frac{A_j}{\sum_{j=1}^3 A_j} \quad (3)$$

式中, $A_j = \sum_{k=1}^m W_k$, A_j 为第 j 类土地损毁扰动的影响值, W_k 为风险表征因子的权重, m 为土地损毁对应的风险因子个数, $k \in R$; $J \in \{ \text{井场, 运输道路, 集输占地} \}$ 。

2.2.3 生态敏感度评价

生态敏感度(ESI)用于表征区域生态系统对维系良好生态环境的重要性及抵抗风险能力大小^[25], 本文从生态重要性 EIV(ecological important value)及生态脆弱性 EVI(ecological vulnerability index)两个方面定量评价区域生态敏感度, 公式如下:

$$ESI_i = EIV_i + EVI_i \quad (4)$$

其中, ESI_i 为第 i 个评价单元的生态敏感度, EIV_i 为第 i 个评价单元的生态重要性, EVI_i 为第 i 个评价单元的生态脆弱性。

(1) 生态重要性(EIV)

参考已有研究成果^[11, 15, 25], 并结合涪陵焦石坝实际生态环境特征, 选择植被覆盖度、生态服务价值、土壤肥力表征区域生态重要性。

① 植被覆盖度 反映区域植物群落覆盖地表状况的一个综合量化指标^[26], 植被覆盖度越高, 生态系统越重要, 通过 NDVI 计算得到。

② 生态服务价值 通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品、服务、自然资源等都含与其相应的价值。本文利用 Landsat5 TM、Landsat8 OLI 影像, 并辅助高清 Google 地图解译, 将研究区土地系统分为耕地、林地、草地、水域、农村居民用地、工矿用地等 6 类; 基于单位面积价值当量因子的方法^[27], 计算区域的生态服务价值当量^[28-29](表 2)。

表 2 涪陵焦石坝页岩气产建区生态系统服务价值当量

Table 2 The ecological service value of lands in the shale gas development region at Fuling Jiaoshiba

土地利用类型 Land use type	生态系统服务价值当量/(元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) Ecosystem service value	土地利用类型 Land use type	生态系统服务价值当量/(元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) Ecosystem service value
耕地	9617.61	水域	55420.42
林地	34364.33	农村居民用地	0
草地	14261.44	工矿用地	-21316

③ 土壤肥力 直接反映区域生物物质的优质适产、可持续供给植物养分以及抵御侵蚀的能力^[30]。本文的土壤类型、土种及分布来自于涪陵区土壤志, 土壤养分、微量元素等土壤肥力相关参数来自中国土壤科学数据库。

(2) 生态脆弱性(EVI)

考虑页岩气开采特点的同时, 参照生态红线, 选择土壤侵蚀度、石漠化敏感度及水环境敏感度表征区域生态脆弱性。

① 土壤侵蚀度 土壤侵蚀是岩溶地区面临的主要生态问题, 大规模页岩气开采地表扰动大, 加快土壤退化。根据修正的通用土壤侵蚀方程(USLE)^[31], 获得土壤侵蚀强度分布特征。

② 石漠化敏感度 石漠化是区域水土流失后地表呈现石质化的现象, 是喀斯特地区最为严重的生态环境问题^[32]。研究区为典型的喀斯特地区, 局部石漠化程度高, 参照《生态功能区划技术规程》中石漠化敏感性评价方法, 结合实地调查, 完成区域石漠化敏感度评价。

③ 水环境敏感度 页岩气开采的水压裂耗水量大, 返排量大, 压裂液含近百种化学试剂, 给区域水环境带来威胁。研究区地处岩溶区, 地下水丰富, 岩层孔隙裂隙发育, 地下水极易污染, 运用魏兴萍^[33]等修正的 RISK 模型实现区域地下水脆弱性分级; 另外, 区内乌江纵穿, 地表水环境脆弱。根据页岩气开采环境影响评价方法, 结合区域水域的生态功能, 实现地表水环境敏感度分级(表 3)。

表 3 涪陵焦石坝页岩气产建区地表水环境敏感度分级标准

Table 3 The classification standard of surface water environment sensitivity in shale gas development region at Fuling Jiaoshiba

分级 Classification	影响目标 Influence of the target	范围/m Range	分级 Classification	影响目标 Influence of the target	范围/m Range
极敏感	乌江	两侧 200	轻度敏感	水源水库	周边 400—600
	水源水库	周边 200		非水源水库	周边 200
高度敏感	乌江	两侧 200—400		磨溪河、后溪河	两侧 200
	水源水库	周边 200—400		乌江	两侧 600—1000
中度敏感	乌江	两侧 400—600m			

(3) 生态敏感度综合评价

将以上 6 个评价因子标准化,并在专家打分的基础上,结合区域实际,采用层次分析法,设置判断矩阵,获得各指标权重(表 4),判断矩阵一致性检测 $CR = 0.025$, 小于 0.1, 权重较合理。

表 4 涪陵焦石坝页岩气产建区生态敏感度评价指标判别矩阵

Table 4 The matrix of ecological sensitivity assessment index in shale gas development region at Fuling Jiaoshiba

类别 Classes	指标 Index	植被覆盖度 Vegetation coverage	生态服务价值 Ecological service value	土壤肥力 Soil fertility	土壤侵蚀度 Soil erosion	石漠化敏感度 Rocky desertification sensitivity	水环境敏感度 Water environment sensitivity	权重 Weight
生态重要性 Ecological importance	植被覆盖度	1	1/2	3	1/3	1/3	1/4	0.081
	生态服务价值	2	1	3	1/3	1/2	1/3	0.113
	土壤肥力	1/3	1/3	1	1/5	1/3	1/5	0.046
生态脆弱性 Ecological vulnerability	土壤侵蚀度	3	3	5	1	2	1	0.285
	石漠化敏感度	3	2	3	1/2	1	1/2	0.174
	水环境敏感度	4	3	5	1	2	1	0.301

指标两两比较,甲比乙重要 5,较重要 3,同等重要 1,2,4 为中间值,相反,取倒数

3 结果分析

3.1 生态扰动累积影响

根据风险表征因子权重(表 1),运用公式(3)计算区域井场、道路及集输管线等土地损毁的扰动影响程度 β (表 5),考虑到茂密的植被可以有效阻止土地损毁对周边生态扰动,故以土地损毁为源,植被覆盖度为阻力方面,借助 ARCGIS 中的 Cost Distance 模块计算对外扩散耗费系数 SCC,运用公式(2)分别计算得到 2012 年、2015 年涪陵焦石坝页岩气产建区土地损毁的生态扰动累积影响(图 2)。

表 5 涪陵焦石坝页岩气产建区土地损毁扰动影响程度

Table 5 The ecological disturbance degree of land destruction in the shale gas development region at Fuling Jiaoshiba

土地损毁类型 Land destruction	施工环节 Construction	风险表征因子 Risk factor	权重 Weight	方向 Direction	β_j 影响程度 Impact degree
井场	钻前井场建设	生境破碎/退化	0.102	+	0.509
		生物多样性减少	0.083	+	
		水土流失	0.125	+	
		扬尘污染	0.037	+	
	钻井	土壤污染/退化	0.069	+	
		石漠化	0.091	+	
		噪声污染	0.031	+	
		光污染	0.021	+	

续表

土地损毁类型 Land destruction	施工环节 Construction	风险表征因子 Risk factor	权重 Weight	方向 Direction	β_j 影响程度 Impact degree	
运输道路	设备、压裂试剂运输	放射性污染	0.019	+	0.193	
		压裂试气	大量耗水	0.214		+
		水污染	0.167	+		
		甲烷污染	0.041	+		
		水土流失	0.125	+		
		生境破坏/退化	0.102	+		
		生物多样性减少	0.083	+		
		扬尘污染	0.037	+		
集输占地	输气管线建设	噪声污染	0.031	+	0.298	
		水土流失	0.125	+		
		生境破坏/退化	0.102	+		
		生物多样性减少	0.083	+		
	页岩气集输	土壤污染/退化	0.069	+		
		甲烷污染	0.041	+		
		水污染	0.167	+		

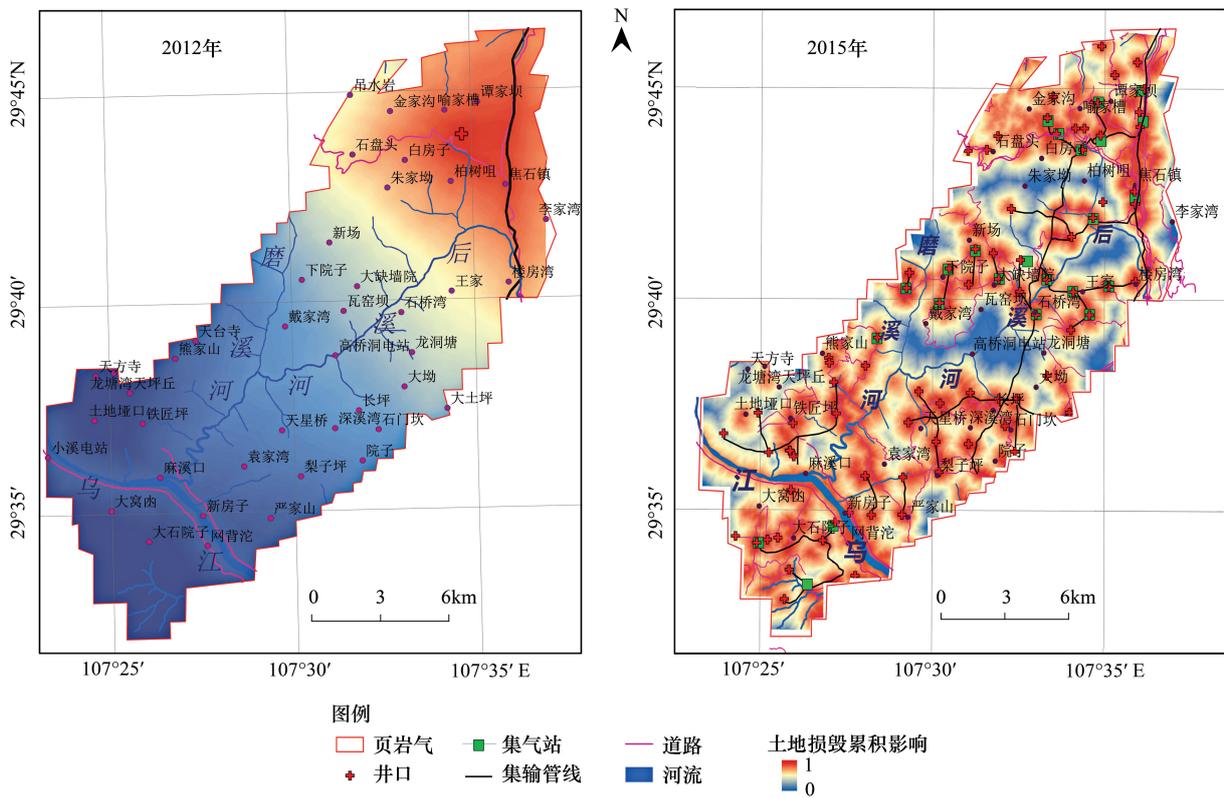


图 2 涪陵焦石坝页岩气产建区土地损毁生态累积影响

Fig.2 Ecological cumulative impact of land destruction in the shale gas development region at Fuling Jiaoshiba

结果表明:从 2012 年页岩气开采初期到 2015 年末,随着页岩气的开采规模不断扩大,涪陵焦石坝页岩气产建区土地损毁扰动强度明显增大,从北部扩展到整个研究区,景观破碎度提高,植被对其扩散阻力小,生态影响累积作用大。2015 年末,涪陵页岩焦石坝页岩气产建区土地损毁面积 14.39km²,井数达 253 口,井密度约 1 口/km²,且分布广;区域内林地面积 110.34 km²,占研究区面积 41.99%,但零星分布,对于工程生态影响向外

扩散有一定阻力作用,但不明显。

3.2 生态敏感度

按照表 4 的评价因子及权重,借助 ArcGIS 空间数据叠加,完成 2012、2015 年区域生态敏感度评价,结果按数据自然断点分成 3 个区,即生态敏感低值区、中值区、高值区(表 6,图 3)。

表 6 涪陵焦石坝页岩气产区生态敏感度分区表

Table 6 The ecological sensitivity in the shale gas development region at Fuling Jiaoshiba

敏感类型 Sensitivity type	2012 年		2015 年	
	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%
生态敏感低值区 Low ecological sensitive area	104.78	39.9	96.51	36.7
生态敏感中值区 Median ecological sensitive area	126.87	48.3	113.91	43.3
生态敏感高值区 High ecological sensitive area	31.14	11.8	52.38	20.0

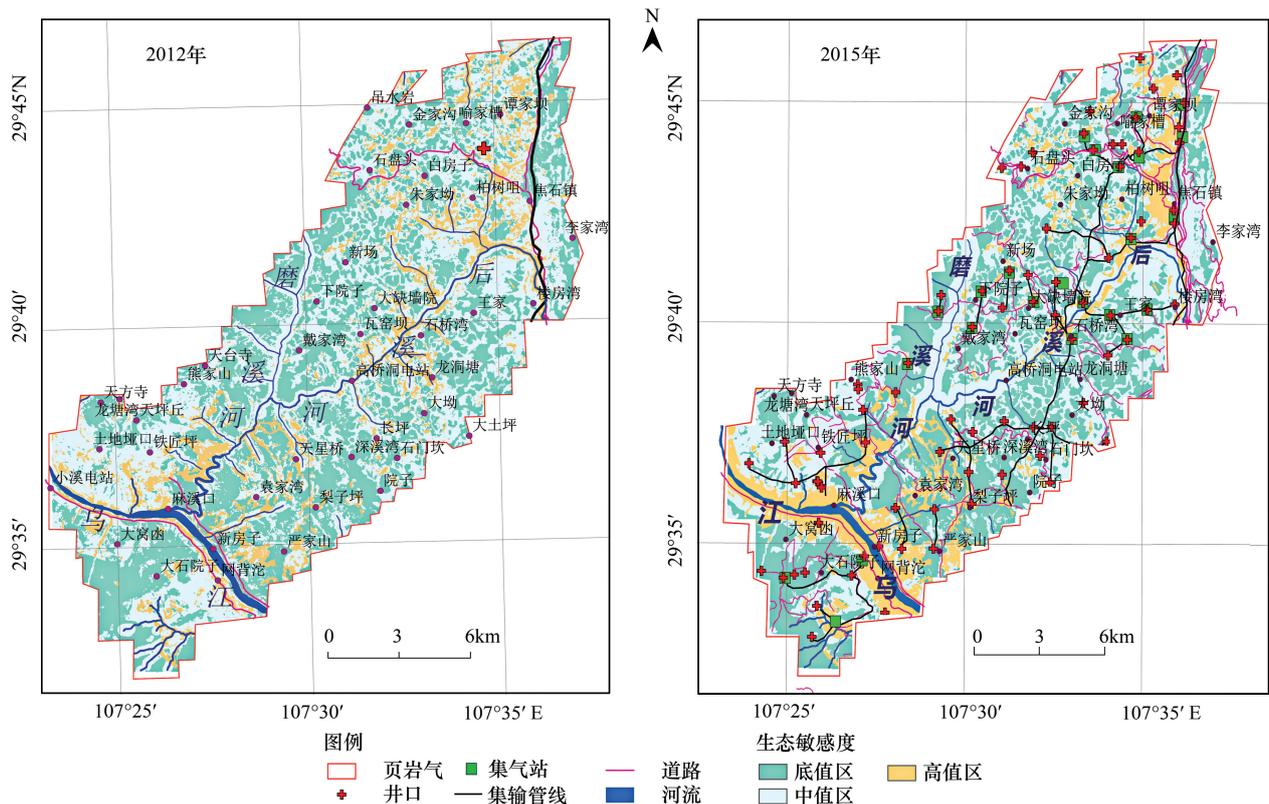


图 3 涪陵焦石坝页岩气产区生态敏感度分布图

Fig.3 The ecological sensitivity of the shale gas production region in Fuling Jiaoshiba

(1)从数量上看,2012—2015 年末,区域生态敏感均以中值为主,分别占总面积的 48.3%,43.3%;生态敏感高值区增加了 21.24 km²(8.2%)。近年的页岩气的大规模开采,井场、道路、管线等工程占地增加,造成区域植被破坏、景观破碎,局部地区的水土流失加重,部分生态敏感低、中值区转成高值区。

(2)从分布上看,2012 年生态敏感高值区零星分布,而 2015 年明显集聚于研究区南、北部,总体格局呈南、北地区高,中部低(图 3)。南部乌江两岸河谷地区,海拔约 350m 左右,坡度小于 15°,土壤类型以黄壤为主,有机质含量约 1.63%,土体较厚,保水保肥力较强,养分含量较高,水、肥、气、热状况协调,适宜耕种,除部分乌江防护林外,土地利用以耕地为主,生态重要性较高;区域页岩气开采用水取自乌江,短时间大量用水,对乌江水生态安全造成一定威胁,且压裂过程耗水量大,返排量大,如压裂液、返排液等存储、处理、利用不当,将造成水污染,区域地表水环境敏感度高。北部地区海拔 800m 左右,坡度大于 15°,土壤类型以石灰土为主,土

地利用以耕地为主,岩溶发育度高,属石漠化高敏感区,植被恢复能力弱,生态系统自我调节能力差,生态敏感度高。生态敏感中值区主要分布于中部磨溪河、后溪河两侧河谷,该区岩溶发育度较高,地下水丰富,土壤类型以石灰土为主,质地为壤质粘土,表层碳酸钙含量 6% 以上,土层浅薄,土壤侵蚀以中度为主,页岩气沿河开采易造成水环境污染,呈中度敏感。磨溪河、后溪河河谷外的低山丘陵区属生态敏感低值区,坡度 15—25°,土壤与裸岩镶嵌分布,不连片,生物富集较强,土质松软,植被类型以松、杉、竹为主,呈零星分布,土壤侵蚀以轻度为主,生态系统相对稳定。

3.3 生态风险

运用公式(1),综合焦石坝页岩气产建区土地损毁生态扰动程度及生态敏感度,结果按照数据自然断点分成 3 个类型区,即低风险区,中等风险区,高风险区(表 7),分别完成 2012 年、2015 年生态风险分区(图 4)。

表 7 涪陵焦石坝页岩气产能建设区生态风险分区表

Table 7 The ecological risk classification of the shale gas development region at Fuling Jiaoshiba

风险类型 Risk type	2012 年		2015 年	
	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%
低风险 Low risk	195.02	74.2	116.23	44.2
中等风险 Medium risk	48.83	18.6	101.94	38.8
高风险 High risk	18.95	7.2	44.63	17.0

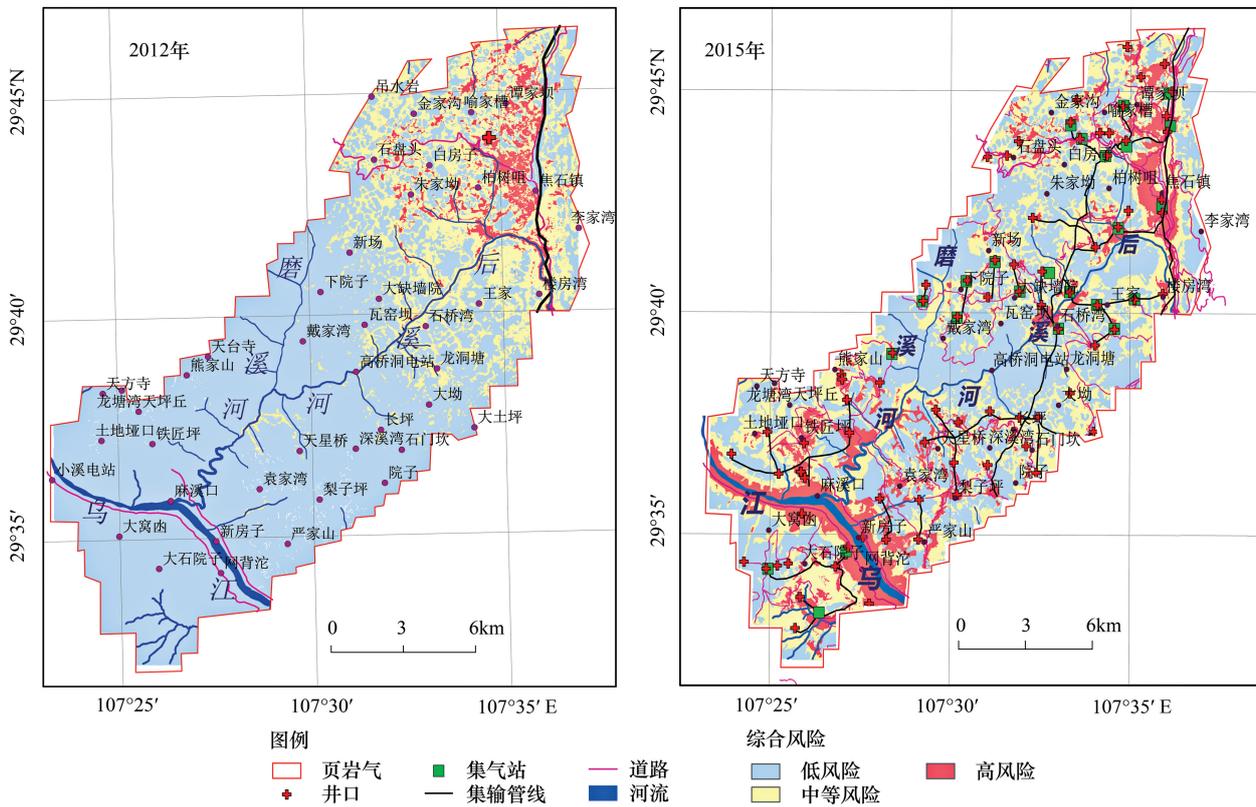


图 4 涪陵焦石坝页岩气产建区生态风险分布图

Fig.4 The ecological risk of the shale gas production region in Fuling Jiaoshiba

(1)从数量上看,2012年,区域 2/3 以上面积为生态低风险区,到 2015 年低风险区面积减少了近 1/3 (78.79 km²);而中、高风险区面积有所增加,从 67.78 km²增到 146.57km²,其中,高风险区增加 25.68 km² (9.8%)。近 3 年的页岩气开采,导致区域土地损毁面积扩大,累积生态影响严重,涪陵焦石坝开采区的基础设施建设及采气中频繁的取水、排污等,导致乌江两岸生态风险增加。

(2)从分布上看,2012—2015年,区域南部乌江沿岸地区及中部后溪河、磨溪河河谷局部地区由低风险转为高风险,北部高生态风险区持续向外扩张。2015年,南、北部高风险区内,页岩气开采土地损毁面积达3.67 km²,占类型区8.2%,井密度大,且生态敏感度高。页岩气开采单井用水量约2—4万 m³,短期大规模用水对乌江水域水生生物、水质有一定影响;另外,压裂返排液盐分含量高达10%,如处理不当,易进入地下、附近水域及周边土壤,加大南部乌江及下游的水环境污染及土壤污染风险。北部低山区的页岩气井场、道路、集输管网等建设,导致区域生境破碎,带来水土流失、石漠化、生物多样性减少等风险。中部生态低风险区,土地利用类型以林地为主,面积64.34 km²,占类型区55.4%,局部植被覆盖度高,一定程度上阻止了页岩气开采生态扰动的向外扩散,且区域土壤侵蚀及石漠化都呈低敏感,生态系统相对安全。

4 结论与讨论

2012—2015年末,涪陵焦石坝页岩气产建区钻井数量迅速增多,分布广,林地分散,植被对土地损毁危害扩散的阻力相对较小,页岩气开采对区域生态影响累积作用增大。本文通过土地损毁的潜在风险表征因子确定其生态扰动强度,即不同类型的土地损毁具有不同的潜在风险,风险表征因子具有不同的权重且为常数,可实现各类土地损毁的生态影响程度量化。但也存在一定问题,实际中,各类风险表征因子的扩散影响因素和扩散方式各不相同,具有空间差异性;相同的土地损毁类型,由于其开采规模、开采强度不同,其对周边环境扰动也有不同,道路的使用频率及集输管线建设规模不同,对生态影响也不同,如何实现各风险因子的空间化,如何细化土地损毁的生态扰动强度有待进一步研究。另外,区域地形、气候、景观类型、植被覆盖度、生态兼容性等都对土地损毁生态扰动强度对外扩散有影响,而涪陵焦石坝页岩气产建区属磨溪河流域,面积偏小,地形起伏小,气候差异不明显,景观破碎度较高,对比之下区域植被覆盖度差异明显,故以其为区域土地损毁扰动扩散阻力因子。如今后实现面积较大区域的评价时,可考虑多方面综合计算土地损毁扰动阻力。

涪陵焦石坝页岩气产建区地处岩溶地区,生态相对脆弱,生态敏感高值区占区域面积的1/5,中值区约占一半,主要分布于乌江、磨溪河、后溪河两侧河谷及北部低山地区。区域生态敏感度越高,页岩气开发过程中的大量钻井作业、工程运输和集输管道建设造成的生态风险就逐年增大,是生态环境监管及生态风险防治的重点地区。到2015年末,生态风险中,高值区达146.56 km²,占总面积55.8%,且空间分异显著。页岩气开采生态环境影响是动态的,生态风险也是动态的,故多时序遥感影像监测区域生态环境演变过程,实现区域生态风险动态评价是可行的。

页岩气开发土地损毁的生态环境影响因素多、生态环境风险大,贯穿页岩气勘探开发的全过程。严格控制及合理布设页岩井位,尽量避开大江大河、重要生态功能区、严重水土流失等生态敏感高值区,尽快恢复运输道路两侧及集输管线建设区的地表植被;针对页岩气开采中的钻井、压裂、试气等排污关键环节,加强井场及周边地表水、地下水、土壤、大气环境的监测,控制污染物浓度在生态环境可接受范围内^[34]。坚持空间分区、风险分级和全过程防控的理念,管理页岩气开发的生态环境风险,以保障区域生态环境安全。

致谢:感谢重庆师范大学李月臣教授对本研究的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 916-927.
- [2] Toelle B E, Alexander T, Baihly J, Boyer C, Clark B, Jochen V, Calvez J L, Lewis R, Miller C K, Thaeler J, Toelle B E. Shale gas revolution. *Oilfield Review*, 2011, 23(3): 40-55.
- [3] Howarth R W, Ingraffea A, Engelder T. Natural gas: should fracking stop? *Nature*, 2011, 477(7364): 271-275.
- [4] Howarth R W, Santoro R, Ingraffea A. Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change*, 2011, 106(4): 679-690.

- [5] Drohan P J, Brittingham M, Bishop J, Yoder K. Early trends in landcover change and forest fragmentation due to shale-gas development in Pennsylvania: a potential outcome for the Northcentral Appalachians. *Environmental Management*, 2012, 49(5): 1061-1075.
- [6] Racicot A, Babin-Roussel V, Dauphinais JF, Joly JS, Noël P, Lavoie C. A framework to predict the impacts of shale gas infrastructures on the forest fragmentation of an Agroforest region. *Environmental Management*, 2014, 53(5): 1023-1033.
- [7] Moran M D, Cox A B, Wells R L, Benichou C C, McClung M R. Habitat loss and modification due to gas development in the Fayetteville shale. *Environmental Management*, 2015, 55(6): 1276-1284.
- [8] 张思锋, 刘晗梦. 生态风险评价方法述评. *生态学报*, 2010, 30(10): 2735-2744.
- [9] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664-677.
- [10] 曾勇. 区域生态风险评价——以呼和浩特市区为例. *生态学报*, 2010, 30(3): 668-673.
- [11] 蒙吉军, 周婷, 刘洋. 区域生态风险评价: 以鄂尔多斯市为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(5): 935-943.
- [12] 赵肖, 张娅兰, 李适宇. 滴滴涕对太湖经济鱼类危害的生态风险. *生态学杂志*, 2008, 27(2): 295-299.
- [13] 姚华荣, 崔保山. 澜沧江流域云南段土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响. *环境科学学报*, 2006, 26(8): 1362-1371.
- [14] 李然然. 查干湖湿地水环境演变及生态风险评估[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014: 79-99.
- [15] Landis W G. Twenty years before and hence; ecological risk assessment at multiple scales with multiple stressors and multiple endpoints. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9(5): 1317-1326.
- [16] 高宾, 李小玉, 李志刚, 陈玮, 何兴元, 齐善忠. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析. *生态学报*, 2011, 31(12): 3441-3450.
- [17] 孙琦, 白中科, 曹银贵, 谢苗苗, 胡兴定, 姜彦竹, 卢元清. 特大型露天煤矿土地损毁生态风险评价. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 278-288.
- [18] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价. *环境科学*, 2015, 36(11): 4232-4240.
- [19] 张学林, 王金达, 张博, 洪梅. 区域农业景观生态风险评价初步构想. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 712-716.
- [20] 常青, 邱瑶, 谢苗苗, 彭建. 基于土地破坏的矿区生态风险评价: 理论与方法. *生态学报*, 2012, 32(16): 5164-5174.
- [21] 钟林生, 李萍. 甘肃省阿万仓湿地旅游开发生态风险评价及管理对策. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1444-1451.
- [22] 王道富, 高世葵, 董大忠, 黄旭楠, 王玉满, 黄金亮, 王淑芳, 蒲泊伶. 中国页岩气资源勘探开发挑战初论. *天然气工业*, 2013, 33(1): 8-17.
- [23] Steinzor N, Subra W, Sumi L. Investigating links between shale gas development and health impacts through a community survey project in Pennsylvania. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 2013, 23(1): 55-83.
- [24] 陈午, 许新宜, 王红瑞, 王崴. 基于改进序关系法的北京市水资源可持续利用评价. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 164-176.
- [25] 常青, 刘丹, 刘晓文. 矿业城市土地损毁生态风险评价与空间防范策略. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 245-254.
- [26] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 高帅, 江波, 赵祥. 植被覆盖度遥感估算研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774-782.
- [27] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [28] 马骏, 马朋, 李昌晓, 彭月, 魏虹. 基于土地利用的三峡库区(重庆段)生态系统服务价值时空变化. *林业科学*, 2014, 50(5): 17-26.
- [29] 唐紫晗, 李妍均, 陈朝, 鲁嘉濠. 西南山区采煤塌陷地生态服务价值分析——以重庆市松藻矿区为例. *水土保持研究*. 2014, 21(2): 172-178.
- [30] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 孙余丹, 胡砚秋. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价. *生态学报*, 2014, 34(9): 2297-2307.
- [31] 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 肖焱, 肖强. 基于 GIS 重庆土壤侵蚀及土壤保持分析. *生态学报*, 2015, 35(21): 7130-7138.
- [32] 刘春霞, 李月臣, 杨华. 三峡库区(重庆段)石漠化敏感性评价及空间分异特征. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(3): 291-297.
- [33] 魏兴萍, 蒲俊兵, 赵纯勇. 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价. *生态学报*, 2014, 34(3): 589-596.
- [34] 梁鹏, 张希柱, 童莉. 我国页岩气开发过程中的环境影响与监管建议. *环境与可持续发展*, 2013, 38(2): 25-26.