

页岩气开发区井场开发对土地利用和生物量的影响

陈宏坤¹ 杜显元¹ 郭宇² 张心昱^{3,4*} 吴骞⁵ 王秋兵² 贺吉安⁶ 马良⁷

(¹石油石化污染物控制与处理国家重点实验室/中国石油安全环保技术研究院,北京 102206; ²沈阳农业大学土地与环境学院,沈阳 110866; ³中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101; ⁴中国科学院大学资源与环境学院,北京 100190; ⁵哈尔滨师范大学地理科学学院,哈尔滨 150025; ⁶中国石油川庆钻探工程有限公司,成都 610056; ⁷中国石油浙江油田分公司,杭州 310007)

摘要 在我国四川页岩气开发区井场周围受人类活动影响较大的村镇、农田,页岩气开发对土地利用变化、植被生物量影响还不清楚.本研究利用2012、2017年遥感影像解译及2017年地面样方调查数据,分析页岩气开发区的井场、缓冲区土地利用和生物量变化,分析页岩气井区的影响范围及其造成的植被生物量损失.结果表明:2012—2017年间,页岩气开发使93.81 hm²土地转化为工矿用地,其中,近一半(48.6%)为旱地(45.61 hm²),17.2%为有林地(16.13 hm²),11.0%为居民点(10.28 hm²),11.1%为灌木林地(10.39 hm²);页岩气井区开发阶段影响范围在0~50 m,在进入稳产阶段后影响范围减少;页岩气开发造成研究区植被生物量损失2477.53 t,其中,71.6%由井场直接压占造成,其余(28.4%)由井场附属道路及临时占地引起.页岩气井场直接压占旱地和有林地是页岩气开发区土地利用变化和生物量损失的重要原因.本研究可为该区域的生态环境管理、页岩气开发的可持续发展提供科学依据.

关键词 页岩气开发; 井场; 土地利用; 植被生物量

Influences of shale gas well-pad development on land use and vegetation biomass in a shale gas mining area. CHEN Hong-kun¹, DU Xian-yuan¹, GUO Yu², ZHANG Xin-yu^{3,4*}, WU Qian⁵, WANG Qiu-bing², HE Ji-an⁶, MA Liang⁷ (¹State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control, CNPC Research Institute of Safety and Environment Technology, Beijing 102206, China; ²College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; ³Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ⁴College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ⁵College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China; ⁶CNPC Chuanqing Drilling Company Limited, Chengdu 610056, China; ⁷CNPC Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 310007, China).

Abstract: It is not clear how shale gas mining would affect land use change and vegetation biomass in the villages and farmlands where was substantially influenced by human activities around the well-pads of the shale gas mining areas in Sichuan Province. Using remote sensing and image interpretation in 2012 and 2017 and *in situ* vegetation investigation data in 2017, we analyzed the changes of land use and biomass in well-drilling fields and buffer zones and further examined the extent affected by well-drilling and subsequently vegetation biomass loss. The results showed that shale gas mining had converted 93.81 hm² of land to mining land from 2012 to 2017, among which almost half (48.6%) was dry land (about 45.61 hm²), 17.2% forest land (16.13 hm²), 11.0% residential

本文由国家科技重大专项(2016ZX05040002-005-001, 2016ZX05040002-001-004)和中国石油天然气集团公司重大科技专项(2016E-1205)资助
This work was supported by the National Science and Technology Major Project (2016ZX05040002-005-001, 2016ZX05040002-001-004) and the China National Petroleum and Natural Gas Corporation Major Scientific and Technological Project (2016E-1205).

2018-04-30 Received, 2018-08-02 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxy@igsnr.ac.cn

land (10.28 hm²), and 11.1% shrubland (10.39 hm²). The extent affected by well-drilling ranged from 0 to 50 m at the early stage, which decreased at the stage of stable gas production. As a result of well-drilling, over 2477.53 t of vegetation biomass was lost, of which 71.6% being accounted for by the well-drilling fields and the remaining (28.4%) being caused by road construction and temporary land use. Direct occupation of dry land and forested land by shale gas well-pads mainly caused land use changes and biomass losses in this shale gas mining area. Our results have implications for ecological environment management and shale gas sustainable mining in this area.

Key words: shale gas mining; well-drilling field; land use; vegetation biomass.

页岩气指赋存于富含有机质的泥岩、页岩及其夹层中,以吸附或游离状态为主要存在方式的非常规天然气,成分以甲烷为主,是一种清洁、高效的能源资源。我国页岩气技术可开采储量约31.6万亿m³,占全球储量的15.4%,居全球首位,其中,四川地区资源最丰富^[1-2]。近年随着国内对天然气需求量增加以及开采技术的进步^[3-4],页岩气开采在我国迅速发展。2016年度,四川在长宁区块、威远区块、昭通区块(四川境内部分)、井研-犍为区块、威远-荣县区块钻井87口,建成页岩气年产能35亿m³,页岩气产量达到25亿m³以上^[5]。研究四川页岩气开发对土地利用及植被生物量影响机制,可为该区域的生态环境管理、页岩气开发的可持续发展提供科学依据。

与开采传统天然气资源相比,页岩气开发水力压裂技术需水量大^[6],页岩气平台占地较大,对地表土壤的扰动较大^[7]。目前,国际上关注页岩气开发的生态环境问题有水资源大量消耗与污染^[8-9]、土壤的扰动和侵蚀风险^[10]、甲烷泄露造成的温室效应^[11-12]等。在美国Williston、Marcellus、Eagle Ford等页岩气片区,在开发前该区域受人类活动影响较小,页岩气开采过程中的井场施工、道路及管线的敷设造成的土地利用变化^[13-15]、破坏森林、草原植被,使得页岩气开发区景观破碎化^[16-17]、动物栖息地减少^[13-15,18]。无规划、粗放的井场布置会加重页岩气开发对生态环境的破坏^[10],而有效规划井场位置、优化基础设施可以降低页岩气开发对生态环境的影响^[19]。

与美国页岩气开发区不同,四川页岩气井区受人类活动影响较大,页岩气开发具有整体规划性^[20],集中开发方式也与美国相对自由的开发方式不同^[21]。四川页岩气开发区地少人多,局部为喀斯特区域,生态环境脆弱。以涪陵焦石坝页岩气开采区为例,区域内55.8%为中、高生态风险区,面临水环境污染、生境破坏、生物多样性减少、石漠化加重的生态风险^[18,22]。而到目前为止,在四川页岩气开发

区,页岩气开发对土地利用、植被生物量的影响方式、影响范围还不清楚。本研究利用高分遥感影像解译与实地调查技术相结合的手段,分析页岩气开发对四川省某典型页岩气开发区的土地利用、生物量变化的影响方式、影响强度、影响范围,并分析页岩气开发对该区域土地利用与植被生物量影响机制,旨在为后期页岩气开发规划优化和生态保护提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地南缘,处于珙县、筠连县、兴文县交界地带(图1),占地面积29528.11 hm²,地势北高南低,海拔400~1150 m。研究区所在地属于亚热带湿润季风气候,雨热同期,年降水量为1050~1618 mm,年均温为18℃。研究区为典型的喀斯特地貌,地质条件复杂,土地利用类型以有林地、灌木林地为主,旱地、水田次之,林地植被类型包括杉木林、柳杉林、香椿林等;农用地主要种植玉米、水稻。土壤类型包括石灰(岩)土、黄壤,局部地区水土流失严重。

1.2 数据来源

以研究区2012、2017年2期遥感影像、野外实地调查、谷歌地球等相关资料作为主要信息源,并搜集研究区2012—2017年农地耕作面积、单产数据(表1)。

2012年为页岩气开发初始期,研究区共有页岩气开发平台6个,2017年研究区共有页岩气开发平台39个。

1.3 野外调查

本研究选择井场附近500 m以内的不同植被类型进行样方调查,其中,乔木样方为10 m×10 m、灌木样方为5 m×5 m、草本样方为1 m×1 m、凋落物样方为1 m×1 m。调查样方内植物种类、株数、存活状态、胸径(基径)、高度、盖度。采用收获法调查草本样方地上植物及凋落物生物量。本研究共选择11个典

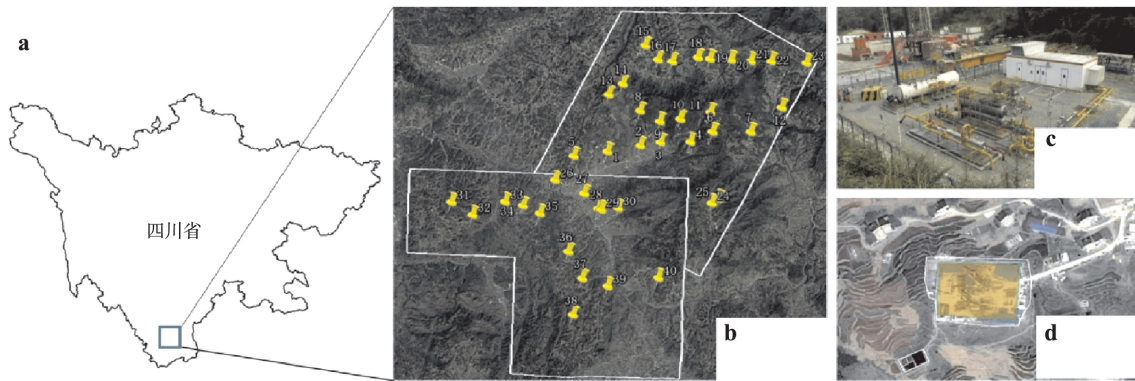


图 1 四川某页岩气开发区区位示意图 (a)、井场分布图 (b)、井场实景图 (c) 和井场鸟瞰图 (d)

Fig.1 Location of a shale gas mining area in Sichuan Province (a) ,site of well-pad fields (b) ,a well-drilling field (c) ,and aerial view of a well-pad (d) .

表 1 四川某页岩气开发区数据特征

Table 1 Background data sources of the studied shale gas mining area in Sichuan Province

数据类型 Data type	数据采集时间 Acquisition date	空间尺度 Spatial scale	数据来源 Data source
资源一号 ZY-1	2012-07	2 m×2 m	中国资源卫星应用中心 http://www.cresda.com/CN/
Spot6	2017-07	1.5 m×1.5 m	中国资源卫星应用中心 http://www.cresda.com/CN/
谷歌地球 Google Earth	-	-	谷歌地图 Google Inc.
植被样方数据 Vegetation sample data	2017-07	-	实地样方调查 <i>In situ</i> sample investigation
农作物数据 Crop data	2015—2017	-	宜宾市统计年鉴 http://www.statsyb.gov.cn/yibinshitongjinnian-jian/index.html

型井场进行样方调查,其中,调查乔木样方 12 个、灌木样方 12 个、草本样方 16 个、凋落物样方 16 个。在全部 39 个井场设置土地利用类型样点,共 97 个土地利用类型样点,用手持 GPS 记录经纬度坐标,确定样点土地利用类型,用作遥感影像解译的精度验证。

1.4 土地利用分类方法

根据研究区土地利用现状,结合国家《土地利用现状分类》^[23]标准,将研究区土地利用类型划分为 13 种类型:有林地、灌木林地、草地、水田、旱地、其他林地、园地、居民点用地、交通用地、未利用地、工矿用地、水域、裸地。工矿用地主要为页岩气开发井区^[24],页岩气开发井区由井场、道路、管线构成^[12],道路属于交通用地,而管线埋设于地下,并及时进行回填,影响较小,因此本研究主要以井场作为研究对象。

在 ArcGIS 10.2 支持下,按照土地利用分类系统建立解译标志,通过监督分类和目视解译相结合,获取 2012 和 2017 年 2 期土地利用数据。应用野外调查采样点的数据在 Erdas 软件下对遥感影像分类结果进行精度检验,总的精确度大于 85%,符合精度要求^[25]。获得 2012、2017 年 2 个时期土地利用类型

分类图后,在 ArcGIS 10.2 中进行计算并制作专题图,将 2 期数据进行空间叠加分析,获得 2012—2017 年土地利用变化数据和图件。

1.5 页岩气井场开发对土地利用和生物量影响范围研究方法

根据 2017 年页岩气井场开采(工矿用地)占用土地数据,运用 GIS 中 Analysis Tools—BUFFER 工具,从井场边界向外进行缓冲区分析,分为 0~10、10~20、20~50、50~100 m 4 个等级缓冲区,研究 2012—2017 年各等级缓冲区中有林地、灌木林地、水田、旱地等转化为居民点、交通用地和临时占地的比例,计算不同缓冲区生物量损失,确定页岩气开发对土地利用、生物量影响范围。

1.6 植被生物量估算方法

根据实地样方调查,研究区乔木树种主要为杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、香椿(*Toona sinensis*)、木姜子属(*Litsea* sp.)等人工林和次生林,其中,柳杉、杉木应用树种的回归模型进行计算,其他树种应用乔木通用回归模型计算(表 2)^[26-29];灌木群落优势种为高粱泡(藤本)(*Rubus lambertianus*)、润楠(*Machilus pingii*)、鼠李(*Rhamnus davurica*)等,其中,润楠、鼠李

表 2 乔木树种生物量回归模型
Table 2 Regression models for tree biomass

物种/器官 Species/Organs	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient (r)	胸径范围 Range of DBH (cm)
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	$B = 0.930(DBH^2 H)^{0.8030}$	0.9760	-
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	$B = 0.2567DBH^{1.7417} H^{0.4855}$	0.9806	-
其他乔木 地上部分 Aboveground biomass	$B = 0.06(DBH^2 H)^{0.8}$	0.9200	0 < DBH ≤ 10
Other trees 树干 Stem	$B = 0.414(DBH^2 H)^{0.9354}$	0.9945	3 ≤ DBH ≤ 28.6
树枝 Branch	$B = 0.032DBH^{2.3399}$	0.9391	3 ≤ DBH ≤ 28.6
树叶 Leaf	$B = 0.01377(DBH^2 H)^{0.72566}$	0.9487	3 ≤ DBH ≤ 28.6
地上部分 Aboveground biomass	$B = 0.0755(DBH^2 H)^{0.8941}$	0.9872	3 ≤ DBH ≤ 28.6

DBH: 胸径 Diameter at breast height (cm); H: 树高 Height (cm); B: 生物量 Biomass (kg). 下同 The same below.

表 3 灌木生物量回归模型
Table 3 Regression models for shrub biomass

物种 Species	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient (r)	径级 DBH classes (cm)
润楠 <i>Machilus pingii</i>	$B = 2.6211(DBH^2 H)^{0.8565}$	0.9733	1.0 ≤ DBH ≤ 19.9
鼠李 <i>Rhamnus davurica</i>	$B = 1.9545(DBH^2 H)^{0.8996}$	0.9568	1.0 ≤ DBH ≤ 12.4
高粱泡(藤本) <i>Rubus lambertianus</i>	$\ln B = -1.423 + 2.155 \ln DBH$	0.9767	-
其他灌木 Other shrubs	$B = 0.5418(DBH^2 H) + 17.287$	0.7817	DBH < 1.0 (n = 55)
	$B = 0.5834(DBH^2 H) - 8.151$	0.9584	1.0 < DBH ≤ 5.0 (n = 66)
	$B = 2.0141(DBH^2 H)^{0.889}$	0.9228	DBH > 5.0 (n = 26)

应用相应树种的回归模型计算,其他树种应用灌木通用回归模型计算^[30](表3)。草地生物量采用刈割称量法测定,采割草本样方内的所有草本植物,称量生物量鲜质量,样品带回实验室后85℃恒温烘至恒量,计算每个样方生物量干质量。凋落物生物量为收集样方内所有凋落物,称量生物量鲜质量,带回实验室后85℃恒温烘至恒量,计算每个样方生物量干质量。

根据当地一年两熟的耕作制度,参考统计年鉴的作物产量与本地区农作物收获指数,玉米为0.52、水稻为0.52^[31-32],计算耕地的生物量,计算公式如下:

$$B = GY/HI \quad (1)$$

式中: B 为农作物生物量(kg); GY 为农作物产量(kg); HI 为不同农作物收获指数。

2 结果与分析

2.1 页岩气开发区土地利用变化

2012—2017年间,研究区有林地、水田、未利用地、其他林地减少,旱地、灌木林地、交通用地、工矿用地、居民点大幅增加;灌木林地增加主要集中在研究区北部山地,旱地增加主要集中在南部平原;居民点增加主要集中在原有居民点周边,而工矿用地增加与页岩气开发相关(图2)。研究区居民点、交通用

地和裸地面积分别增加了173.58(17.8%)、211.67(47.0%)、71.06 hm²(119.4%),工矿用地面积增加93.81 hm²,增幅比例最高(240.1%),水域面积基本未变(图3)。2012—2017年间,研究区页岩气开采

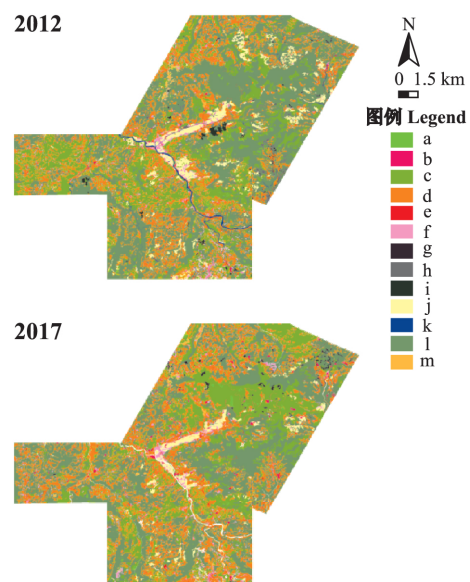


图 2 2012、2017 年研究区土地利用类型

Fig. 2 Land use types in the study area in 2012 and 2017.

a) 草地 Grassland; b) 工矿用地 Mining land; c) 灌木林地 Shrub land; d) 旱地 Dry land; e) 交通用地 Traffic land; f) 居民点 Residential land; g) 裸地 Bare land; h) 未利用地 Unused land; i) 其他林地 Other wood land; j) 水田 Paddy field; k) 水域 Water; l) 有林地 Forest land; m) 园地 Orchard. 下同 The same below.

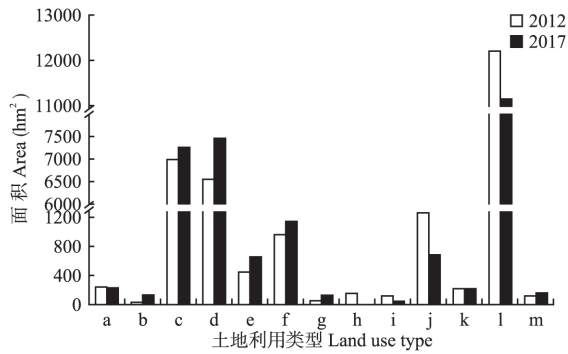


图3 2012、2017年研究区土地利用类型面积变化
Fig.3 Area changes of different land use types in the study area in 2012 and 2017.

的工矿用地主要占用灌木林地 (10.39 hm²)、旱地 (45.61 hm²)、居民点 (10.28 hm²)、水田 (4.36 hm²)、有林地 (16.13 hm²)、草地 (0.48 hm²)、交通用地 (0.85 hm²)、裸地 (4.71 hm²)、未利用地 (0.11 hm²)、水域 (0.89 hm²) (图4)。

2.2 页岩气井场不同缓冲区土地利用变化

在页岩气井区4个缓冲区中,有林地、灌木林地、旱地、水田发转化为居民点和交通用地、工矿用地的转化比率大小依次为(0~10 m) > (10~20 m) > (20~50 m) > (50~100 m),变化范围为48.2%~8.5%(图5)。其中,旱地转化面积最大,其次为有林地,灌木林地与水田的转化面积相当。

2.3 页岩气开发引起植被生物量损失

2017年,研究区林地、灌木林地、草地、水田、旱地生物量分别为69.58、3.29、2.14、16.33、11.04 t·hm⁻²。2012、2017年,研究区总生物量分别为989194.2、922257.5 t,研究期间生物量减少66936.7 t,由页岩气开发造成的生物量减少量为2477.5 t,占总减少量的2.5%。

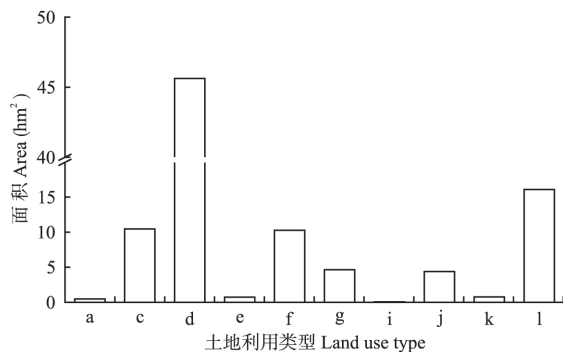


图4 2012—2017年页岩气开发区新增采矿用地占用不同类型土地面积
Fig.4 Areas of different land use types occupied by shale gas mining from 2012 to 2017.

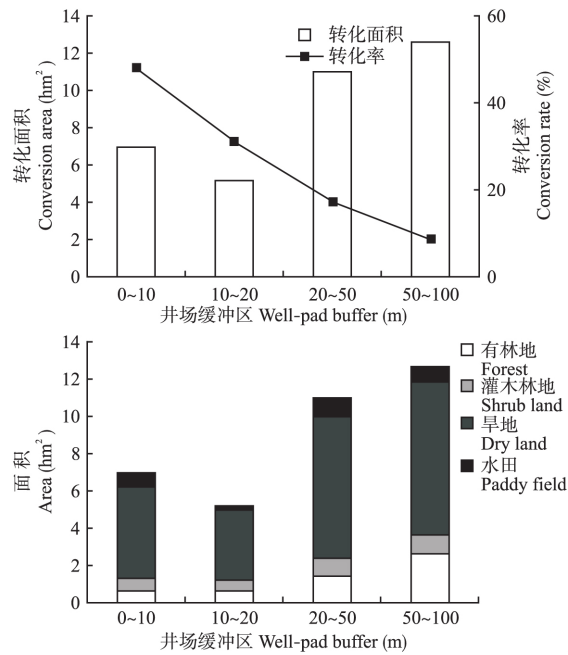


图5 2012—2017年研究区井场各级缓冲区土地利用变化
Fig.5 Land use changes in different well-pad buffer zones in the study area during 2012–2017.

在页岩气开发造成的损失生物量中,页岩气井场直接压占导致1772.9 t (71.6%)的生物量损失,井场缓冲区地类转化导致生物量损失量为704.6 t (28.4%)。井场直接压占生物量损失中,有林地最高,为1134.9 t (64.0%),旱地其次,为515.5 t (29.1%),灌木林第三,为35.9 t (2.0%),草地损失生物量最少,为1.0 t (0.1%) (图6)。

在0~10 m缓冲区范围内,有林地、灌木林地、

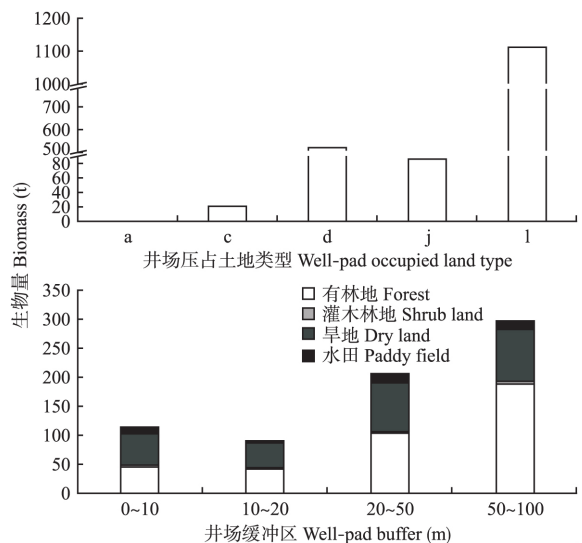


图6 2012—2017年页岩气开发区井场导致植被生物量损失
Fig.6 Vegetation biomass losses caused by shale gas mining from 2012 to 2017.

旱地、水田分别损失生物量 46.6 t (41.0%)、2.4 t (2.1%)、53.2 t (46.9%)、11.27 t (9.9%); 在 10~20 m 缓冲区范围内,有林地、灌木林地、旱地、水田分别损失生物量 43.1 t (47.6%)、1.9 t (2.1%)、41.4 t (45.7%)、4.3 t (4.7%); 在 20~50 m 缓冲区范围内,有林地、灌木林地、旱地、水田分别损失生物量 103.7 t (50.3%)、2.9 t (1.4%)、83.7 t (40.6%)、15.8 t (7.7%); 在 50~100 m 缓冲区范围内,有林地、灌木林地、旱地、水田分别损失生物量 188.6 t (64.1%)、3.3 t (1.1%)、89.4 t (30.4%)、13.1 t (4.4%) (图 6)。

3 讨 论

2012—2017 年,研究区页岩气工矿用地增加所占地类以旱地最多,并占用有林地、居民点、灌木林地,这与美国 Williston、Fayetteville 页岩气开发区情况不相同^[13,17]。由于美国页岩气开发区多处于自然保护区,植被覆盖率高,并且许多土地所有权归属个人,页岩气开发公司以及土地所有者主导开发行为^[10],开发选址更多的考虑经济效益,而对地上植被不做更多保护,因此其所占地类主要为有林地或灌木林地。我国四川页岩气开发区处于人类活动密集地区,主要土地利用类型是旱地和有林地,土地所有权归属集体,页岩气开发活动由中石油、中石化主导^[20],开发选址可以兼顾经济效益与生态影响,因此其占地尽量避免有林地等自然植被类型,占地以旱地为主。

页岩气开发对井场 0~10 m 缓冲区范围土地利用的影响最大,主要是在页岩气开发过程中需要对井场周边进行平场、退线以及钻屑堆放等临时占地;而在页岩气井场 10~20 m 缓冲区范围,主要影响源于进场道路的修建与拓宽、工程机械的临时占地;在页岩气井场 20~50 m 缓冲区范围内,在井场建设阶段建设了员工宿舍、排水池等临时附属设施占地,但是随着页岩气井场进入稳产阶段,施工人员撤离,临时设施占地会逐步复垦,恢复原有土地类型;在页岩气井场 50~100 m 缓冲区范围内,除了新建或拓宽连接井场的道路外,页岩气开发活动对土地利用的影响很小。研究区页岩气开发的建设阶段对土地利用的影响范围主要在 0~50 m,当井场进入稳产阶段,各种临时复垦后,页岩气开发对土地利用的影响范围会减小。

有研究表明,页岩气开发会对当地农作物产量乃至生物量造成显著影响^[33]。但本研究中页岩气开发对研究区植被生物量的影响,相比美国页岩气开

发区影响较小。主要原因为:我国页岩气井区直接压占的主要用地类型是旱地,其单位生物量小于有林地甚至水田,而美国页岩气开发区多压占有林地或高覆盖度的草地^[15,34];我国单位井场平台一般布置 6 个钻井,土地利用效率较高,而在美国 Marcellus 片区,私有土地与公有土地单位井场平台平均布置 3.5 和 5.4 个钻井^[17],在宾夕法尼亚州页岩气开发区大部分井场只布置 1~2 个钻井,其土地利用效率较低。我国页岩气开发活动仍可以进一步减少对生物量的影响,现阶段开发选址更注重井场直接压占的地类,避免选址有林地等单位生物量高的地类,但对井场外围缓冲区中道路和各类临时占地选址则相对缺少规划,造成页岩气开发影响的边缘区域有林地损失较大。

根据美国页岩气开发经验以及我国四川地区脆弱的生态条件,为减少页岩气开发造成的土地利用类型变化、生物量损失,应进一步加强选址规划,包括井场选址以及井场外围道路、临时占地的选址^[13];在经济、技术条件允许的情况下进一步提高井场单位钻井数;缩短井场施工时间,加速临时占地的复垦为原始地类^[35],使井区早日进入稳产阶段,减少井区对周边地类、生物量的影响。

4 结 论

本研究应用遥感与实地调研相结合的手段,分析四川某页岩气开发区页岩气开发活动对土地利用、生物量变化的影响及影响范围。结果表明:2012—2017 年,研究区页岩气工矿用地增加所占地类中,旱地最多,并占用有林地、居民点、灌木林地;页岩气开发对土地利用的影响范围主要在 0~50 m,在稳产后,实施临时占地复垦,影响范围将有所下降;页岩气开发对研究区植被生物量影响较小,其影响主要以井场直接压占为主,缓冲区内影响为辅。

参考文献

- [1] Zou C-N (邹才能), Tao S-Z (陶士振), Bai B (白斌), et al. Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas. *China Petroleum Exploration* (中国石油勘探), 2015, 20(1): 1-16 (in Chinese)
- [2] U.S. Energy Information Administration. Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States [EB/OL]. (2013-12-12) [2018-04-30]. <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/fullreport.pdf>

- [3] Xu P-Y (徐沛宇), Wang Y (王勇). Gas shortage is approaching this winter? *Energy (能源)*, 2017(11): 63-66 (in Chinese)
- [4] Wang S-Q (王世谦). Shale gas exploitation: Status, issues and prospects. *Natural Gas Industry (天然气工业)*, 2017, 37(6): 115-130 (in Chinese)
- [5] General Office of the Sichuan Provincial Government (四川省人民政府办公厅). Sichuan Shale Gas Industry Development 2016 Implementation Plan [EB/OL]. (2016-04-12) [2018-04-30]. <http://zwcj.sc.gov.cn/xxgk/NewT.aspx?i=20160421100049-673832-00-000> (in Chinese)
- [6] Allred BW, Smith WK, Twidwell D, et al. Ecosystem services lost to oil and gas in North America. *Science*, 2015, 348: 401-402
- [7] Fink CM, Drohan PJ. Dynamic soil property change in response to reclamation following northern Appalachian natural gas infrastructure development. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79: 146-154
- [8] Vidic RD, Brantley SL, Vandenbossche JM, et al. Impact of shale gas development on regional water quality. *Science*, 2013, 340: 1235009-1-9
- [9] Gonzalez CC, Naderpour M, Ramezani F, et al. Water resource selection and optimisation for shale gas developments in Australia: A combinatorial approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 124: 1-11
- [10] Krupnick A, Wang Z, Wang Y, et al. Environmental risks of shale gas development in China. *Energy Policy*, 2014, 75: 117-125
- [11] Howarth RW, Ingraffea A, Engelder T. Natural gas: Should fracking stop? *Nature*, 2011, 477: 271
- [12] Annevelink MP, Meesters JA, Hendriks AJ. Environmental contamination due to shale gas development. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 431-438
- [13] Moran MD, Cox AB, Wells RL, et al. Habitat loss and modification due to gas development in the Fayetteville shale. *Environmental Management*, 2015, 55: 1276-1284
- [14] Pierre JP, Abolt CJ, Young MH. Impacts from above-ground activities in the eagle ford shale play on landscapes and hydrologic flows, La Salle County, Texas. *Environmental Management*, 2015, 55: 1262-1275
- [15] Farwell LS, Wood PB, Sheehan J, et al. Shale gas development effects on the songbird community in a central Appalachian forest. *Biological Conservation*, 2016, 201: 78-91
- [16] Drohan PJ, Brittingham M, Yoder K, et al. Early trends in landcover change and forest fragmentation due to shale gas development. *Environmental Management*, 2012, 49: 1061-1075
- [17] Langlois LA, Drohan PJ, Brittingham MC. Linear infrastructure drives habitat conversion and forest fragmentation associated with Marcellus shale gas development in a forested landscape. *Journal of Environmental Management*, 2017, 197: 167-176
- [18] Zhang H (张虹), Zhang D-J (张代钧), Lu P-L (卢培利), et al. Ecological risk assessment of land destruction by shale gas development at Fuling Jiaoshiha, China. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2017, 37(17): 5807-5817 (in Chinese)
- [19] Milt AW, Gagnolet TD, Armsworth PR. The costs of avoiding environmental impacts from shale-gas surface infrastructure. *Conservation Biology*, 2016, 30: 1151-1158
- [20] Development and Reform Commission of People's Republic of China (中华人民共和国国家发展和改革委员会). CNPC Changning-Weiyuan National Shale Gas Demonstration Area Totaled more than 1.8 Billion Cubic Meters of Gas Production [EB/OL]. (2016-04-12) [2018-04-30]. http://yxj.ndrc.gov.cn/mtzhgl/201610/t20161030_824688.html (in Chinese)
- [21] Wei Y-S (位云生), Jia A-L (贾爱林), He D-B (何东博), et al. Comparative analysis of development characteristics and technologies between shale gas and tight gas in China. *Natural Gas Industry (天然气工业)*, 2017, 37(11): 43-52 (in Chinese)
- [22] Zhao XG, Yang YH. The current situation of shale gas in Sichuan, China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 653-664
- [23] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of People's Republic of China (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局), China National Standardization Management Committee (中国国家标准化管理委员会). Current Land Use Condition Classification(GB/T 21010-2017) [EB/OL]. (2017-11-01) [2018-01-01]. http://www.360doc.com/content/18/0123/20/45453950_724528144.shtml (in Chinese)
- [24] Sichuan Environmental Protection Department (四川省环境保护厅). Approval of the Environmental Impact Report of the Shale Gas Development Capacity Building Projects in the Three Blocks of Changning, Weiyuan and Zhaotong [EB/OL]. (2016-02-19) [2018-04-30]. http://www.schj.gov.cn/hjgl/hjbj/jsxmhjxpxj/201603/t20160304_238048.html (in Chinese)
- [25] Bu R-C (布仁仓), Chang Y (常禹), Hu Y-M (胡远满), et al. Measuring spatial information changes using Kappa coefficients: A case study of the city groups in central Liaoning Province. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2005, 25(4): 778-784 (in Chinese)
- [26] Zhu S-Q (朱守谦), Wei L-M (魏鲁明), Chen Z-R (陈正仁), et al. Preliminary study on the composition of biomass in Karst forest in Maolan. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 1995, 19(4): 358-367 (in Chinese)
- [27] Yu L-F (喻理飞), Ye J-Z (叶镜中). Evaluation on degradation of Karst forest community and human disturbance. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2002, 13(5): 529-532 (in Chinese)
- [28] Li Y (李燕), Zhang J-G (张建国), Duan A-G (段爱国), et al. Selection of biomass estimation model for Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, 21(12): 3036-3046 (in Chinese)

- [29] Qin S-J (覃世杰), Li K (李况), Mo D-X (莫德祥), *et al.* Biomass regression model of the *Cryptomeria fortunei* plantation in southeast subtropical region of Guangxi. *Journal of Southern Agriculture* (南方农业学报), 2013, **44**(2): 261–265 (in Chinese)
- [30] Li C-C (刘长成), Wei Y-F (魏雅芬), Liu Y-G (刘玉国), *et al.* Biomass of canopy and shrub layers of karst forests in Puding, Guizhou, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, **33**(4): 698–705 (in Chinese)
- [31] Xie G-H (谢光辉), Han D-Q (韩东倩), Wang X-Y (王晓玉), *et al.* Harvest index and residue factor of cereal crops in China. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2011, **16**(1): 1–8 (in Chinese)
- [32] He Q (何强), Xing J-J (邢俊杰), Shu F (舒服), *et al.* Review and prospect for the research on harvest index in rice. *Hybrid Rice* (杂交水稻), 2012, **27**(6): 3–6 (in Chinese)
- [33] Olmstead SM, Muehlenbachs LA, Shih JS, *et al.* Shale gas development impacts on surface water quality in Pennsylvania. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**: 4962–4967
- [34] Preston TM, Kim K. Land cover changes associated with recent energy development in the Williston Basin, Northern Great Plains, USA. *Science of the Total Environment*, 2016, **566/567**: 1511–1518
- [35] Pierre JP, Young MH, Wolaver BD, *et al.* Time series analysis of energy production and associated landscape fragmentation in the Eagle Ford shale play. *Environmental Management*, 2017, **60**: 852–866

作者简介 陈宏坤,男,1977年生,高级工程师.主要从事石油行业生态和场地环境调查与修复技术研究. E-mail: 30015920@qq.com

责任编辑 杨弘

陈宏坤,杜显元,郭宇,等.页岩气开发区井场开发对土地利用和生物量的影响.应用生态学报,2018,29(10):3377–3384
Chen H-K, Du X-Y, Guo Y, *et al.* Influences of shale gas well-pad development on land use and vegetation biomass in a shale gas mining area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(10): 3377–3384 (in Chinese)