

陕北采煤迹地LUCC过程及区域内生态系统 主控因子识别研究探讨

李 刚^{1,2,3,4,5}, 卢 楠^{1,2,3,4,5}

¹陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

²陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安

³陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

⁴自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁵陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年10月18日; 录用日期: 2021年11月22日; 发布日期: 2021年11月29日

摘 要

采煤迹地是一种因人类及自然因子的严重干扰, 生态环境发生巨大改变, 生态系统的组成与结构发生了急剧变化的退化生态系统。由于人们迄今尚不清楚煤炭资源开采对矿区生态环境效应的影响机理, 避免矿区生态环境破坏、修复受损土地、改善矿区生态环境等都是十分复杂、困难和富有挑战的工作。因此, 了解煤炭资源开采所引起的LUCC变化及其响应规律是协调采煤迹地土地复垦与生态环境保护迫切需要解决的关键科学问题之一。科学量化陕北采煤迹地LUCC过程, 开展区域内生态系统主控因子识别的研究, 对于其他同类环境中LUCC过程和生态环境保护具有启示作用和示范意义。

关键词

采煤迹地, LUCC, 主控因子, 生态系统, 识别

Study on the LUCC Process and the Identification of the Main Controlling Factors of the Ecological System in the Coal Mining Area in Northern Shaanxi

Gang Li^{1,2,3,4,5}, Nan Lu^{1,2,3,4,5}

¹Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an Shaanxi

³Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

⁴Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁵Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 18th, 2021; accepted: Nov. 22nd, 2021; published: Nov. 29th, 2021

Abstract

The coal mining site is a degraded ecosystem that has undergone tremendous changes in the ecological environment and the composition and structure of the ecosystem due to severe interference from humans and natural factors. Since people have not yet understood the mechanism of impact of coal resource mining on the ecological environment of the mining area, avoiding damage to the ecological environment of the mining area, repairing damaged land, and improving the ecological environment of the mining area are all very complex, difficult and challenging tasks. Therefore, understanding the changes of LUCC caused by coal resource mining and its response rules is one of the key scientific issues that urgently need to be resolved in coordinating the land reclamation of coal mining sites and ecological environment protection. Scientifically quantify the LUCC process in coal mining sites in northern Shaanxi, and carry out research on the identification of the main control factors of the ecosystem in the region, which has enlightening and demonstrative significance for the LUCC process and ecological environment protection in other similar environments.

Keywords

Coal Mining Site, LUCC, Main Control Factor, Ecosystem, Identification

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土地利用/土地覆盖变化(LUCC)是人类活动影响自然地表环境最直接、最主要的方式之一,也是人类在生存、发展过程中与土地生态环境进行物质、能量交互的重要环节。从人类的发展历史而言,人类由于需要不断去满足自身的生存和发展状态,而通过有意识或无意识行为活动对各种土地类型利用的数量、方式、强度等产生直接或间接的影响,进而使得土地的发展趋势也会随之产生相应的变化[1] [2]。此影响过程与土地表面系统的物质能量循环以及生命发展过程也有着密不可分的关系[3]。研究表明,LUCC通过改变陆表生物地球化学过程(碳氮源、汇等过程)以及生物地球物理过程(包括地表反照率、粗糙度、水热过程等)对区域和全球气候和生态环境产生深刻影响[4]-[9]。LUCC过程是环境变化的动力,环境变化则是土地利用结果的累积。近百年以来强烈人类活动导致的LUCC已成为全球生态环境变化的重要驱动因素之一[10] [11] [12] [13] [14]。特别是在生态脆弱区包括开矿采煤等人类活动导致的区域尺度上的LUCC过程对生态环境影响表现的尤为显著[15] [16] [17] [18]。

煤矿区作为一个特殊的复杂地理区域,长时间、大规模和高强度煤炭开采不可避免地破坏原生的矿床地质条件,占用和破坏大量土地,引发植被退化、水土流失及物种减少等一系列严重的生态环境问题

[19] [20]。据测算, 仅土地破坏, 每开采万吨煤炭造成的土地塌陷率平均在 $0.20\sim 0.33 \text{ hm}^2$ 。[21]保守估计, 截止到 2013 年底中国由于煤炭资源开采累计塌陷地面积超过 100 万 hm^2 , 且每年仍以 $3.0\sim 4.7 \text{ 万 hm}^2$ 的速度增加[22]。由于陕北采煤迹地位于自身环境比较脆弱的毛乌素沙地, 采矿对土体、植被的破坏加剧了该区域的生态环境恶化, 要对该区域进行修复治理, 必须先明确该区域内生态环境的变化过程和影响其变化的主要因素是哪些? 一直以来, 一些学者认为研究 LUCC 过程对生态系统影响及特征是生态环境领域的核心内容之一[4] [6] [9], 所以本研究基于以上问题和现状, 对陕北地区采煤迹地的 LUCC 过程和生态系统主控因子的识别方法进行了探讨, 以期为煤矿采空区的修复治理提供理论依据。

2. 研究区概况

陕北地区地处中国黄土高原的中心部位, 地貌形态复杂多样, 干旱少雨, 是我国生态环境最为脆弱的地区之一。同时, 陕北又是我国重要的煤炭资源及能量化工基地[23], 其不仅煤炭资源极为丰富, 大型、特大型煤田也特别集中。截止 2015 年末陕北侏罗纪煤田和陕北石炭二叠纪煤田的资源量分别占陕西省资源量的 52% 和 31%, 其中陕北地区煤炭产量占全国煤炭总产量的 18.1%。但是随着陕北煤炭资源的大规模开采使得原有的地形地貌发生改变, 含水层被破坏, 地面沉陷和地下水位下降, 植物枯死; 河流和泉流量衰减甚至断流, 水井和湖泊干涸; 土壤沙漠化和水土流失等严重的生态环境问题[24]。

3. 研究现状及存在的主要问题

区域土地利用/土地覆盖变化(LUCC)及其环境效应目前已成为土地科学研究热点问题之一, 有关研究主要集中于区域土地利用变化的区域气候、水文效应以及对土壤养分和生物多样性的影响等方面[25] [26]。国内在 LUCC 及其人文驱动方面的研究起步相对而言较晚, 但取得了较为丰富的研究成果。早期土地方面的研究涉及到的主要内容包括土地利用的调查、图件的编制、数据库、分区、分类、规划设计及开发管理等, 主要是为满足社会经济建设的需要。基于金陵大学农学院仆凯教授担当主持的中国东部农业区调查项目的基础上, 出版了一本《中国土地利用》的书籍, 相对较早的提出了 LUCC 一些研究问题, 主要是系统地描述项目研究区域内的 LUCC 现状及存在的问题[27]。随后, 国内一些相关大学也逐渐开始了与之相关的项目研究。近些年, 我国研究学者针对国内土地利用的特征与现状, 在国外学者和机构的研究成果基础上, 运用相关研究模型对我国 LUCC 开展了进一步研究, 阐释并指出我国在土地利用过程中存在哪些人文因素, 对 LUCC 产生的影响及其影响机理[28]。

目前, 卫星遥感监测技术和影像分类方法的不断发展, 遥感影像数据被广泛应用。在 3S 技术的推动下, 国内土地研究学者不仅对 LUCC 变化状况及其驱动力等问题进行深入的分析, 还利用多种数学统计模型和空间化手段等对其驱动力因素与其之间的关系进行了定量化和空间化分析[29]。张惠远等针对贵州省的喀斯特地区 LUCC 变化进行了相关研究, 揭示了其土地利用变化状况及影响其变化的驱动因素指标, 并深入地分析了二者之间的联系[30]; 林文芳等以秦岭为研究对象, 采用系统动力学方法对其土地利用变化驱动因子进行了研究, 指出影响研究区域城镇用地变化的主要因素可以分为居住用地、工业用地和第三产业用地[31]; 史培军等基于遥感影像数据对深圳市的土地利用变化进行了时空分析, 并且探讨了其与生态安全水平的相互关系, 指出引起深圳市土地利用变化的主要原因是城市化的加速[32]等。丁建丽等通过对新疆于田遥感资料的整理、分析, 揭示了该绿洲-荒漠交错带一年间的土地利用土地覆盖时空变化状况[33]。巴雅尔等运用 RS 与 GIS 技术, 通过对年一年间的蒙中经济区的各种资料的分析, 揭示了内蒙古蒙中经济区大城市边缘带的 LUCC 状况[34]。

尽管在生态脆弱区开展了大量 LUCC 状况研究, 然而对于生态脆弱区采煤迹地的土地利用/覆盖变化及其影响因素、区域内土地生态主控因子的研究较少。作为强烈人类活动影响生态脆弱区自然环境的典

型区域, 近年来陕北采煤迹地生态环境、气候变化以及 LUCC 过程受到了越来越多的关注, 由于土地利用/覆被变化的机制对解释土地覆被时空变化和建立土地覆被变化的预测模型起关键作用[35], 在区域性尤其是在生态脆弱和复杂地区土地利用/覆盖变化研究时, 由于驱动因子 - 土地利用和土地覆被系统的变化机制极为复杂, 且在空间和时间尺度上的变化难以把握, 使得在采煤迹地等生态环境脆弱区域的 LUCC 过程研究遇到了较大的困难, 通过在以陕北采煤迹地为例的生态脆弱区 LUCC 过程及区域内生态系统主控因子的研究, 可以了解该区域内土地利用变化的时空特征, 通过诊断区域内生态系统主控因子, 不仅对该区域内土地修复、可持续利用和生态保护具有重要的科学意义, 而且对同类生态环境脆弱区的生态环境保护和可持续利用具有示范意义。

4. 陕北采煤迹地 LUCC 过程及区域内生态系统主控因子识别研究探讨

1) 陕北采煤迹地土地利用变化动态分析数据准备

可采用 1980 s、1990 s、2000 s 以及 2010 s 期间陕北采煤迹地 TM 遥感影像, 收集研究区域土地详查图件和数据资料, 通过野外调查建立各种地类判读标志资料。通过遥感图像作为主要的数据库, 同时结合统计和调查数据对陕北采煤迹地进行综合系统模拟研究。利用 GIS 技术收集陕北采煤迹地大量的遥感信息、文本数据、图片等相关数据进行矢量化、数据预处理等相关的处理, 并建立统一的地理坐标系统, 在统一的地理坐标系统下, 将各个不同来源的数据进行加工处理, 将其转化为可为采煤迹地生态环境 LUCC 的实时动态变化信息。应用 GIS 软件 ARC/INFO 生成矢量数据文件, 建立空间信息库, 并应用 GIS 的空间叠加功能, 进行图形叠加生成动态变化图, 获得动态变化数据库, 从而得到两个时段间研究区土地利用类型转换矩阵, 进一步分析各种土地利用类型之间的相互转化特征(马尔科夫模型(Markov))。

$$\text{转换矩阵: } A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix}$$

其中 A_{ij} 是指 k 时期第 i 种土地利用类型转变为 $k+1$ 时期 j 种土地类型的面积。通过转化矩阵可以计算 k 时期 i 种土地利用类型转变为 $k+1$ 时期 j 种土地类型的比例, 公式如下:

$$B = A_{ij} \times 100 / \sum_{i=1}^n A_{ij}$$

而 $k+1$ 时期各种土地利用类型相对于 k 时期的变化程度一般用相对变化率来表示。其计算公式为:

$$\text{相对变化率} = \left(\sum_{i=1}^n A_{ij} - \sum_{j=1}^n A_{ij} \right) \times 100 / \sum_{j=1}^n A_{ij}$$

2) 评价指标体系的构建

将点位数据、单一土地利用类型数据和区域数据有机结合, 依据土地生态学和管理学原理, 以综合性、全面性、代表性和方便性为原则, 着眼于采煤迹地土地系统本身的状态指标和对区域土地生态影响最直接的人为响应指标, 从基础、胁迫、结构与效益角度构建 4 个准则层和 15 个指标。土地生态基础准则反应区域地形地貌、土壤条件、水文气候和植被状况等土地自然生态背景。胁迫准则层反映人类开发利用对土地格局和土壤理化性质的双重影响。前者表征土地生态系统的污染和退化状况, 后者表征土地生态系统斑块、廊道和景观层面的格局特征。效益准则层反映土地的经济效益, 衡量土地生态系统的生产功能和社会价值。主要评价指标(图 1)包括: 地形位指数(地形地貌)、土壤条件(表土质地、土层厚度、

土壤有机质、土壤污染综合指数)、植被状况、水文气候、生态干扰、人为开采、斑块、廊道及景观等不同尺度格局、生态价值。

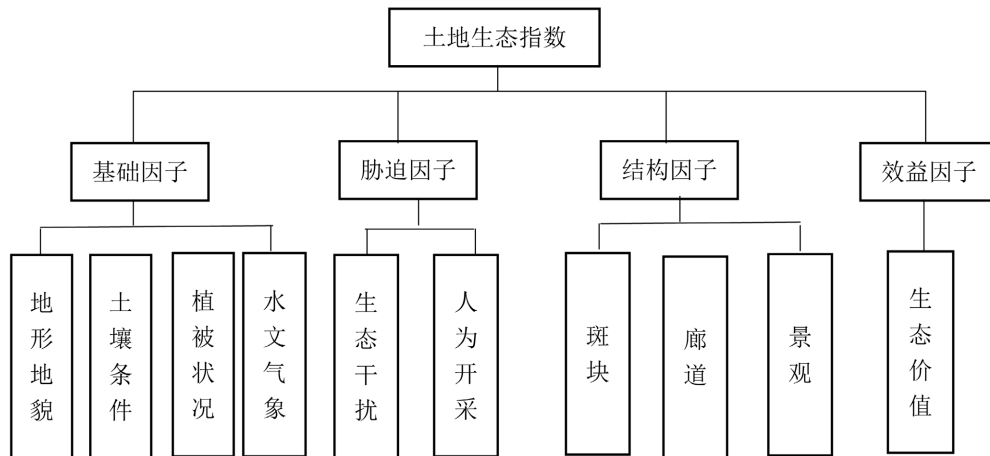


Figure 1. Land Ecological Impact Index
图 1. 土地生态影响指标

3) 研究区土地现状生态评价

选用综合指数法评价。采用以下公式计算各评价单元的土地生态指数[36]:

$$LEI_n = \sum_{i=1}^k W_k G_k$$

LEI_n 是第 n 个评价单元的土地生态指数, G_k 是标准化后的第 k 个评价指标值, W_k 是第 k 个评价指标的权重值, n 为评价单元个数, k 为评价指标个数。

4) 研究区内土地利用现状驱动力分析与主控因子分析

本研究采用决策树法(classification and regression tree, CART)研究不同因子对陕北采煤迹地土地生态系统的贡献度。采用 Clementine 12.0 软件, 将土地生态指数分类结果作为决策层, 将指标变量作为分类叛变变量层输入, 通过控制变量法和 CART 中的训练精度比对分析, 实现各生态因子对陕北采煤迹地土地生态指数分级结果的贡献率评价。利用典型相关法、回归统计法、因子分析法等方法对陕北采煤迹地土地生态系统主控因子进行分析验证。

5. 小结

通过多年数据收集, 并建立包括基础因子、胁迫因子、结构因子和效益因子在内的评价指标体系, 通过综合指数法进行研究评价, 并采用决策树法对生态系统贡献度进行研究, 可以实现各生态因子对陕北采煤迹地土地生态指数分级结果的贡献率。最终科学量化陕北采煤迹地 LUCC 过程, 开展区域内生态系统主控因子识别的研究, 对于其他同类环境中 LUCC 过程和生态环境保护具有启示作用和示范意义。

基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2020-21)。

参考文献

- [1] Mooney, H.A., Duraiappah, A. and Larigauderie, A. (2013) Evolution of Natural and Social Science Interactions in Global Change Research Programs. *PNAS*, **110**, 3665-3672. <https://doi.org/10.1073/pnas.1107484110>

- [2] Sterling, S.M., Ducharme, A. and Polcher, J. (2012) The Impact of Global Land-Cover Change on the Terrestrial Water Cycle. *Nature Climate Change*, **3**, 385-390. <https://doi.org/10.1038/nclimate1690>
- [3] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究:寻求新的综合途径[J]. 地理研究, 2001, 20(4): 297-304.
- [4] 刘纪远, 邵全琴, 黄麟. 大尺度土地利用变化对全球气候的影响[J]. 中国基础科学, 2015, 17(3): 9.
- [5] Lee, X., Goulden, M.L., Hollinger, D.Y., *et al.* (2011) Observed Increase in Local Cooling Effect of Deforestation at Higher Latitudes. *Nature*, **479**, 384-387. <https://doi.org/10.1038/nclimate1690>
- [6] Devaraju, N., Bala, G. and Nemani, R. (2015) Modelling the Influence of Land-Use Changes on Biophysical and Biochemical Interactions at Regional and Global Scales. *Plant Cell and Environment*, **38**, 1931-1946. <https://doi.org/10.1111/pce.12488>
- [7] Lai, L., Huang, X., Yang, H., *et al.* (2016) Carbon Emissions from Land-Use Change and Management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, **2**, 160-163. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601063>
- [8] Arneth, A., Sitch, S., Pongratz, J., *et al.* (2017) Historical Carbon Dioxide Emissions Caused by Land-Use Changes Are Possibly Larger than Assumed. *Nature Geoscience*, **10**, 79-84. <https://doi.org/10.1038/ngeo2882>
- [9] Deng, X., Zhao, C. and Yan, H. (2013) Systematic Modeling of Impacts of Land Use and Land Cover Changes on Regional Climate: A Review. *Advances in Meteorology*, **2013**, Article ID: 317678. <https://doi.org/10.1155/2013/317678>
- [10] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008, 38(2): 197-210.
- [11] Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., *et al.* (2007) Changes in Climate and Land Use Have a Larger Direct Impact than Rising CO₂ on Global River Runoff Trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 15242-15247. <https://doi.org/10.1073/pnas.0707213104>
- [12] Houghton, R.A. and Nassikas, A.A. (2007) Global and Regional Fluxes of Carbon from Land Use and Land Cover Change 1850-2015. *Global Biogeochemical Cycles*, **31**, 456-472. <https://doi.org/10.1002/2016GB005546>
- [13] Lejeune, Q., Seneviratne, S.I. and Davin, E.L. (2017) Historical Land-Cover Change Impacts on Climate: Comparative Assessment of LUCID and CMIP5 Multimodel Experiments. *Journal of Climate*, **30**, 1439-1459. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0213.1>
- [14] Li, W., Ciais, P., Peng, S., *et al.* (2017) Land-Use and Land-Cover Change Carbon Emissions between 1901 and 2012 Constrained by Biomass Observations. *Biogeosciences*, **14**, 5053-5067. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5053-2017>
- [15] 彭建, 王仰麟, 张源, 等. 滇西北生态脆弱区土地利用变化及其生态效应——以云南省永胜县为例[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 629-638.
- [16] 陈益佳, 廖铁军. 生态脆弱区土地利用变化研究——基于重庆市万州区的分析[J]. 国土与自然资源研究, 2018(2): 26-29.
- [17] 刘秀丽, 郭丕斌, 张勃. 采煤与脆弱生态复合区生态安全评价——以山西为例[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 677-685.
- [18] Peng, J., Xu, Y.Q., Cai, Y.L., *et al.* (2011) The Role of Policies in Land Use/Cover Change since the 1970s in Ecologically Fragile Karst Areas of Southwest China: A Case Study on the Maotiaohe Watershed. *Environmental Science & Policy*, **14**, 408-418. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.03.009>
- [19] Antwi, E.K., Krawczynski, R. and Wiegand, G. (2008) Detecting the Effect of Disturbance on Habitat Diversity and Land Cover Change in a Post-Mining Area Using GIS. *Landscape and Urban Planning*, **87**, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.03.009>
- [20] 徐嘉兴, 李钢, 陈国良, 等. 矿区土地生态质量评价及动态变化[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊 1): 180-186.
- [21] 胡振琪, 肖武, 王培俊, 等. 试论井工煤矿边开采边复垦技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 301-307.
- [22] 侯湖平, 张绍良, 李明明, 等. 基于遥感的潞安矿区土地利用及景观格局演变研究[J]. 生态经济, 2008, 203(10): 337-340.
- [23] 杨述河, 闫海利, 郭丽英. 北方农牧交错带土地利用变化及其生态环境效应——以陕北榆林市为例[J]. 地理科学进展, 2004, 23(6): 49-55.
- [24] 史晓琼, 杨泽元, 张艳娜. 陕北高强度采煤对生态环境影响的研究进展[J]. 煤炭技术, 2016, 35(1): 314-316.
- [25] Al Dousari, A.M., Misak, R. and Shahid, S. (2000) Soil Compaction and Sealing in AL-Aslmi Area, Western Kuwait. *Land Degradation and Development*, **11**, 401-418. [https://doi.org/10.1002/1099-145X\(200009/10\)11:5<401::AID-LDR396>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1099-145X(200009/10)11:5<401::AID-LDR396>3.0.CO;2-4)
- [26] Rei, R.S., Kruska, R.L., *et al.* (2000) Land Use and Land Cover Dynamics in Response to Change in Climatic, Biological and Socio Political Forces: The Case of Southwest Ethiopia. *Landscape Ecology*, **15**, 339-355.

- [27] 史洪超. 土地利用/覆被变化(LUCC)研究进展综述[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(26): 13107-13110.
- [28] 肖宝玉. 我国土地利用/覆被变化驱动力研究进展[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2004, 17(1): 75-78.
- [29] 王辉, 董元华, 李德成. 基于遥感与 GIS 技术的苏州市土地利用动态变化研究[J]. 土壤, 2004, 36(4): 420-423.
- [30] 张惠远, 赵昕奕, 蔡运龙. 喀斯特山区土地利用变化的人类驱动机制研究——以贵州省为例[J]. 地理研究, 1999, 18(2): 136-142.
- [31] 林文芳, 汪权方, 蒋芳. 秦岭地区土地利用/土地覆被变化趋势分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 317-322.
- [32] 史培军, 潘耀忠, 陈晋. 深圳市土地利用/覆盖变化与生态环境安全分析[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 293-299.
- [33] 丁建丽. 土地利用/土地覆盖变化研究进展综述[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2006, 23(1): 5-15.
- [34] 巴雅尔, 敖登高娃. 基于 LUCC 的内蒙古人地关系地域系统调控模式初探[J]. 内蒙古师范大学学报:哲学社会科学版, 2006, 35(2): 91-95.
- [35] 王雪军. 晋陕蒙接壤地区 LUCC 过程驱动力及情景推断[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [36] 窦燕, 陈曦, 包安明. 近 40 年和田河流域土地利用动态变化及其生态环境效应[J]. 干旱区地理, 2008, 31(3): 449-455.