

# 1990—2014 年甘肃省白龙江流域 土地利用变化对人类活动响应

巩杰, 张金茜, 钱彩云, 马学成, 柳冬青

(兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 综合分析 1990—2014 年甘肃省白龙江流域土地利用变化及其对人类活动的响应, 以期为该区未来的土地利用优化提供参考。[方法] 基于 1990 年, 2002 年, 2014 年 3 期遥感影像解译获取的土地利用数据, 计算土地利用变化速度、土地利用转移矩阵和土地利用程度。[结果] 1990—2014 年流域的综合土地利用动态度从 10.24% 增长到 17.59%; 1990—2014 年流域的土地利用类型变化以草地、耕地和林地的转换为主; 1990—2002 年流域内各县(区)的土地利用程度综合变化指数介于 1.38~6.65, 而 2002—2014 年流域内各县(区)的土地利用程度综合变化指数介于 -15.43~0.17。[结论] 1990—2014 年流域人类活动对土地的利用由简单索取开发型转变为保护与生态建设型, 从破坏性、粗放式和低利用效率向保护性、集约式和高利用效率发展。

**关键词:** 土地利用变化; 人类活动; 甘肃省白龙江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0219-06

中图分类号: P951

**文献参数:** 巩杰, 张金茜, 钱彩云, 等. 1990—2014 年甘肃省白龙江流域土地利用变化对人类活动响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 219-224. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.037; Gong Jie, Zhang Jinxi, Qian Caiyun, et al. Response of land use change on human activities in Bailongjiang watershed of Gansu Province during 1990—2014[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 219-224. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.037

## Response of Land Use Change on Human Activities in Bailongjiang Watershed of Gansu Province During 1990—2014

GONG Jie, ZHANG Jinxi, QIAN Caiyun, MA Xuecheng, LIU Dongqing

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education),

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] Land use change and its response to human activities were analyzed comprehensively in Bailongjiang Watershed of Gansu Province during 1990—2014, to provide reference for land use optimization in the future. [Methods] Based on the land use data interpreted from the remote sensing images of 1990, 2002 and 2014, this paper calculated the rate of land use change, the direction of land use transformation and the degree of land use in Bailongjiang watershed of Gansu Province during 1990—2014. [Results] The integrated dynamic degree of land use of the whole watershed increased from 10.24% to 17.59%. The change of land use types was mainly in grassland, arable land and forestland of the watershed during 1990—2014. Comprehensive change index of land use degree of all districts ranged from 1.38~6.65 during 1990—2002 to -15.43~0.17 during 2002—2014. [Conclusion] It proved that land use by human activities had converted from simple development to ecology prone one. Land use shifted from the types of destructiveness, extensive-type and low efficiency to the ones of conservation, intensive-ways and high efficiency in Bailongjiang watershed of Gansu Province during 1990—2014.

**Keywords:** land use change; human activities; Bailongjiang watershed of Gansu Province

收稿日期: 2016-12-07

修回日期: 2017-02-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“甘肃白龙江流域景观格局与生态系统服务功能时空变化研究”(41271199); 甘肃省民生科技计划项目(1503FCME006)

第一作者: 巩杰(1975—), 男(汉族), 甘肃省宁县人, 博士, 硕士生导师, 主要从事景观生态学、土地变化科学、环境遥感与生态评价、生态系统服务等方面的研究。E-mail: jgong@lzu.edu.cn.

土地系统是理解人类—环境关系的纽带和桥梁<sup>[1]</sup>。人类通过不同的土地利用方式改变着陆地表层环境,以追求自身的生存和发展<sup>[2-5]</sup>。近几十年来,随着人口增加、经济发展和科学技术的进步,人类活动对土地利用变化的影响逐步加深。土地利用变化为人类活动所驱动,是人类在变化环境下的主动选择<sup>[6]</sup>,并且土地利用变化是人类活动作用于陆地表层环境的一种重要方式和响应<sup>[3-5,7]</sup>。因此,区域土地利用变化分析可以有效揭示人类活动的方向和程度,在清楚人类活动方向和程度的基础上,可为未来的土地利用优化提供建议,具有重要的借鉴和应用价值。土地利用变化对人类活动程度的响应主要体现在土地利用变化的速度、转移方向和土地利用程度 3 个方面<sup>[2,8]</sup>,可以利用综合土地利用动态度、单一土地利用动态度;土地利用转移矩阵和土地利用程度变化等指标表征。近年来,国内外学者针对土地利用变化与人类活动响应方面进行了大量研究。如: Eduardo Corbelle-Rico 等<sup>[9]</sup>通过对 1956—2005 年西班牙西北部土地利用变化的分析,揭示出人类活动影响土地利用变化的主要因子因研究时段不同而不同。刘纪远等<sup>[8,10]</sup>采用综合土地利用动态度和土地利用程度变化指标开展了中国土地利用变化的时空动态特征;并指出人类活动中的政策调控和经济驱动是导致土地利用变化及其时空差异的主要原因。吕立刚<sup>[11]</sup>等采用综合土地利用动态度、土地利用变化面积转移矩阵和土地利用程度综合指数对江苏省 1985—2008 年的土地利用变化分析发现,追求净产出(利润)的增长是 1985 年以来土地利用变化的内在动力;王三等<sup>[12]</sup>采用土地利用程度变化和马尔可夫土地利用变化矩阵指标对重庆市“一小时经济圈”土地利用动态变化研究结果表明,研究区域各土地利用类型间转移明显,耕地资源流失严重,这与人类活动相关的城市化进程有很大关系。上述研究主要集中于全国和区域尺度,涉及西北山区以及流域尺度研究报道较少。流域是一个特殊的地理单元,流域生态系统及流域综合管理等已成为国际研究热点。中国在流域环境方面存在严峻问题,而它的快速社会经济发展,更深刻地表明了流域生态系统研究的必要性与紧迫性。从流域的角度来解决环境问题并实现社会的可持续发展是一条更有效地应用系统综合的途径<sup>[13]</sup>。因此,亟待开展流域土地利用变化与人类活动响应研究,研究对流域土地利用与人类活动优化、流域综合管理等具有实际意义。甘肃省白龙江流域是长江上游的水源涵养林区、水土保持重点防治区和重要生态屏障。虽然自 1999 年以来国家推行了一系列促进区域生态恢复的

工程,如退耕还林(还草)工程、天然林保护工程等,但由于区域人口及社会经济发展的需要,流域内林业资源被过度开发利用,过度放牧导致草场退化严重,滑坡、泥石流等自然地质灾害频发,生态环境脆弱。故急需开展流域尺度研究以期为流域的土地利用方式改变以及综合治理提供意见。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

甘肃省白龙江流域(32°36′—34°24′N,103°00′—106°30′E)地处青藏高原向秦巴山地和黄土高原过渡的交错地带,是长江二级支流嘉陵江上游的水源涵养区和生态屏障,主要流经迭部县、舟曲县、武都区、宕昌县和文县,流长约 475 km,流域面积约 1.84×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。流域内地势自西北向东南倾伏,海拔高差大,高山峻岭和峡谷盆地相间分布、沟壑纵横,地貌景观多样,主要有:山地地貌、河谷地貌、黄土地貌。流域内气候类型复杂,夏季高温多雨,冬季温凉少雨,年均气温 6~15℃,年均降水量 400~850 mm,降水量季节变化大,7—8 月间常有高强度短时暴雨,冬季降水量较少,且降水时空分布不均匀。

### 1.2 数据源及处理

采用的遥感数据来源于美国地质调查局和国际科学数据服务平台的 Landsat TM/ETM<sup>+</sup> 影像,其分辨率为 30 m,时段分别为 1990,2002,2014 年,月份为 7—8 月。使用 ENVI4.7 对影像数据进行几何纠正、影像增强、影像镶嵌与裁剪等预处理;解译过程在 ArcGIS 10.2 平台上完成,利用野外定点数据和 Google Earth 高分辨率影像对解译数据进行精度验证,遥感影像的解译精度为 96.1%,最后进行拓扑检查及错误修改,满足相关研究分析的需要。根据 LUCC 分类标准<sup>[14]</sup>和白龙江流域实际情况,将土地利用类型分为草地、耕地、居民工矿用地、林地、水域和未利用地共 6 类。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地利用变化速度

(1) 单一土地利用动态度。单一土地利用动态度是表征不同土地利用类型在一定时间段内变化速度的指标,反映人类活动对单一土地利用类型的影响<sup>[15-17]</sup>。计算公式为:

$$K_i = \frac{S_{i_2} - S_{i_1}}{S_{i_1}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $i$ ——土地利用类型; $t_1, t_2$ ——研究时间点; $K_i$ —— $t_1$  到  $t_2$  时段内  $i$  类土地利用类型动态度; $S_{i_1}$ ,  $S_{i_2}$ —— $t_1, t_2$  时间  $i$  类土地利用类型面积(km<sup>2</sup>)。

(2) 综合土地利用动态度。综合土地利用动态度是表征土地利用类型变化速度的指标,反映人类活动对流域土地利用类型变化的综合影响<sup>[8,10]</sup>。以流域内各县(区)为研究单元求得综合土地利用动态度,并在 ArcGIS 中进行可视化分析,分级方法采用 Natural Breaks。计算公式为:

$$S = \left[ \sum_{i=1}^n (\Delta S_{i-j} / S_i) \right] \times \frac{1}{t} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $i$ ——土地利用类型,本研究中  $n=6$ ;  $S$ ——研究时段内流域的综合土地利用动态度;  $\Delta S_{i-j}$ ——初期至末期第  $i$  类土地利用类型转换为其他类土地利用类型面积的总和( $\text{km}^2$ );  $S_i$ ——初始时间第  $i$  类土地利用类型总面积( $\text{km}^2$ );  $t$ ——土地利用变化时间段。

1.3.2 土地利用转移方向 土地利用面积转移矩阵可表征区域土地利用变化的结构特征,揭示人类活动下的土地利用变化方向和面积。该方法来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述,可反映在一定时间间隔下,一个亚稳定系统从  $T$  时刻向  $T+1$  时刻状态转化的过程,从而可以更好地表述土地利用格局的时空演化过程<sup>[18]</sup>,其数学表达形式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $S_{ij}$ ——研究初期与末期的土地利用状态; $n$ ——土地利用的类型数。

1.3.3 土地利用程度 土地利用程度以其综合指数来表征,它可反映人类活动所影响的主要地类,揭示人类活动对土地的开发程度。研究以流域内的县(区)为单元,计算 1990,2002 和 2014 年土地利用程度综合指数和土地利用程度综合变化指数,并对土地利用程度综合变化指数可视化分析,分级方法采用 Natural Breaks。土地利用程度综合指数计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$I = 100 \times \sum_{j=1}^k A_j \cdot C_j \quad (4)$$

同时土地利用程度综合变化指数可定量表征流域内土地利用的综合水平和变化趋势,计算公式为<sup>[18-19]</sup>:

$$\Delta I_{b-a} = I_b - I_a = \left\{ \left( \sum_{j=1}^k A_j \times C_{jb} \right) - \left( \sum_{j=1}^k A_j \times C_{ja} \right) \right\} \times 100 \quad (5)$$

式中: $j$ ——土地利用类型分等级数,本研究中  $k=4$ ;  $I$ ——研究区域的土地利用程度综合指数;  $A_j$ ——第  $j$  等级土地利用程度分级指数;  $C_j$ ——第  $j$  等级的土地利用程度面积百分比;  $\Delta I_{b-a}$ ——土地利用程度综

合变化指数;  $I_a, I_b$ ——时间  $a$  和时间  $b$  研究区域的土地利用程度综合指数;  $C_{ja}, C_{jb}$ ——时间  $a$  和时间  $b$  第  $j$  等级的土地利用程度面积百分比; 100——将指数扩大 100 倍,使差异变大,对比性变强。

其中,  $A_j$  取值根据刘纪远<sup>[14]</sup>提出的土地利用程度的综合分析方法,将土地利用类型整合为未利用地、林地、草地、农业用地、工业用地和城镇聚落地 4 级,分别将其指数设定为 1,2,3,4,值越高,表示人类活动强度越高,反之则较低。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化速度

2.1.1 单一土地利用类型变化速度 1990—2014 年,各土地利用类型面积及其速度表现出不同的变化特点(图 1)。草地和未利用地面积持续减少,且二者变化速度均呈增长趋势:1990—2002 年草地和未利用地的减少速度为 0.2% 和 0.14%,而 2002—2014 年其减少速度为 1.38% 和 0.99%;居民工矿用地面积增加,变化速度亦呈增长趋势:1990—2002 年居民工矿用地的增加速度为 2.69%,而 2002—2014 年其增加速度已达 5.55%,约为前一时段的 2 倍;耕地面积先增后减;增加速度为 2.28%,减少速度为 2.90%;林地和水域面积先减后增,减少速度分别为 0.59% 和 1.44%,增加速度分别为 2.57% 和 7.57%。

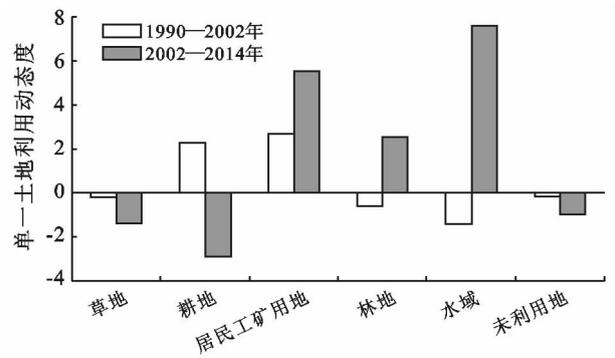


图 1 甘肃省白龙江流域 1990—2014 年各土地利用类型变化速度

2.1.2 流域土地利用变化速度 1990—2014 年,流域的土地利用变化速度大幅增加,反映人类活动对土地利用类型变化的影响进一步加强(表 1)。从各研究时段分析,1990—2002 年的流域综合土地利用动态度为 10.24%,而 2002—2014 年其增长至 17.59%,与前一时段相比,增幅为 71.77%。由于人类活动的区域差异性直接表现于土地利用变化上,而县(区)可以集中反映人类活动的区域差异性,因此,流域内各县(区)为单元探究土地利用变化对人类活动的响应更

为重要。从图 2 可知,1990—2002 年,各县(区)的综合土地利用动态度介于 8.84%~13.08%(图 2);2002—2014 年,各县(区)的综合土地利用动态度介

于 13.60%~21.46%,各县(区)综合土地利用动态度以不同程度增加,增加幅度由大到小依次为:文县>宕昌县>武都区>迭部县>舟曲县。

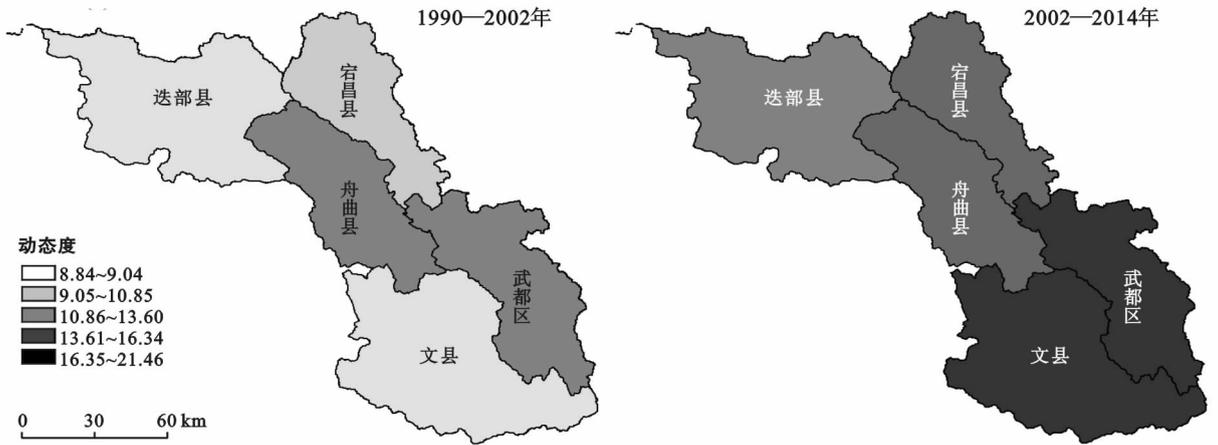


图 2 甘肃省白龙江流域 1990—2014 年各县(区)综合土地利用动态度

## 2.2 流域土地利用类型转移

1990—2014 年,甘肃白龙江流域的土地利用类型变化以草地、耕地和林地的空间转换为主,研究时段不同,表现出的土地利用类型转移特点亦不同(表 1)。具体到单个研究时段上来看,1990—2002 年,草地的转入和转出面积分别为 1 805.7 和 1 977 km<sup>2</sup>,差值较小(171.3 km<sup>2</sup>);耕地的转入和转出面积分别为 1 113.98,376.95 km<sup>2</sup>,差值最大(737.03 km<sup>2</sup>);林地的转入和转出面积分别为 1 051.57 和 1 615.04 km<sup>2</sup>,差值较大(563.47 km<sup>2</sup>),3 种土地利用类型的主要转移特点为:草地转耕地,林地转草地,耕地面积大增,林地面积大减,草地面积变动较小。同时居民工矿用地面积增加,水域和未利用地面积减少。2002—2014 年,草地的转入和转出面积分别为 2 066.67 和 3 232.2 km<sup>2</sup>,差值较大(1 165.53 km<sup>2</sup>);耕地的转入和转出面积分别为 638.24 和 1 834.82 km<sup>2</sup>,差值较

大(1 196.58 km<sup>2</sup>);林地的转入和转出面积分别为 2 993.56,725.67 km<sup>2</sup>,差值最大(2 267.89 km<sup>2</sup>),3 种土地利用类型的主要转移特点为:草地转林地,耕地转草地,林地面积大增,草地和耕地面积减少程度几乎相等。同时居民工矿用地面积继续增加,未利用地面积继续减少,水域面积有所增加。

同时以县(区)为单元的分析可知,流域内各县(区)的土地利用类型转移特点与整个流域的转移特点基本符合,但各县(区)的转移程度差异比较明显(附图 6)。

具体来看,1990—2002 年,草地转耕地主要分布在宕昌县北部、武都区中北部以及文县中北部;林地转草地分布较为分散。2002—2014 年,草地转林地几乎分布于流域内的所有县(区),以文县和迭部县最为显著;耕地转草地主要分布在武都区,文县次之(附图 6)。

表 1 1990—2014 年甘肃白龙江流域土地利用变化面积转移矩阵

研究时段	地类	草地	耕地	居民工矿用地	林地	水域	未利用地
1990—2002	草地	5 233.16	928.88	5.69	1 008.43	5.53	28.47
	耕地	302.34	2 320.94	24.74	40.56	9.3	0.01
	居民工矿用地	1.07	10.79	59.32	0.25	0.52	0
	林地	1 453.87	150.27	1.5	6 313.38	1.86	7.54
	水域	7.23	23.4	3.92	1.08	71.06	0
	未利用地	41.19	0.64	0	1.25	0	379.54
2002—2014	草地	3 806.66	533.08	17.23	2 610.35	41.22	30.32
	耕地	1 339.01	1 600.1	80.34	351.58	54.69	9.2
	居民工矿用地	15.74	14.68	55.39	2.78	6.45	0.13
	林地	631.05	75.33	2.59	6 639.28	10.23	6.47
	水域	15.32	10.55	2.83	3.77	55.53	0.27
	未利用地	65.55	4.6	0.14	25.08	0.36	319.83

### 2.3 流域土地利用程度变化

1990—2014年流域的土地利用开发程度由强转弱,各县(区)表现不同,且差异逐渐变大。由图3可知,1990—2002年,流域内各县(区)的土地利用程度综合变化指数为正值,介于1.38~6.65,表明研究末期耕地和居民工矿用地面积增大程度大于林地和草

地面积减少程度;2002—2014年仅有迭部县的土地利用程度综合变化指数为正值(0.17),其余各县(区)均为负值,介于-15.43~-1,表明研究末期耕地和草地面积减少程度大于林地和居民工矿用地面积增加程度,与1990—2002年相比,2002—2014年流域内县(区)之间的土地利用开发程度差异明显增加。

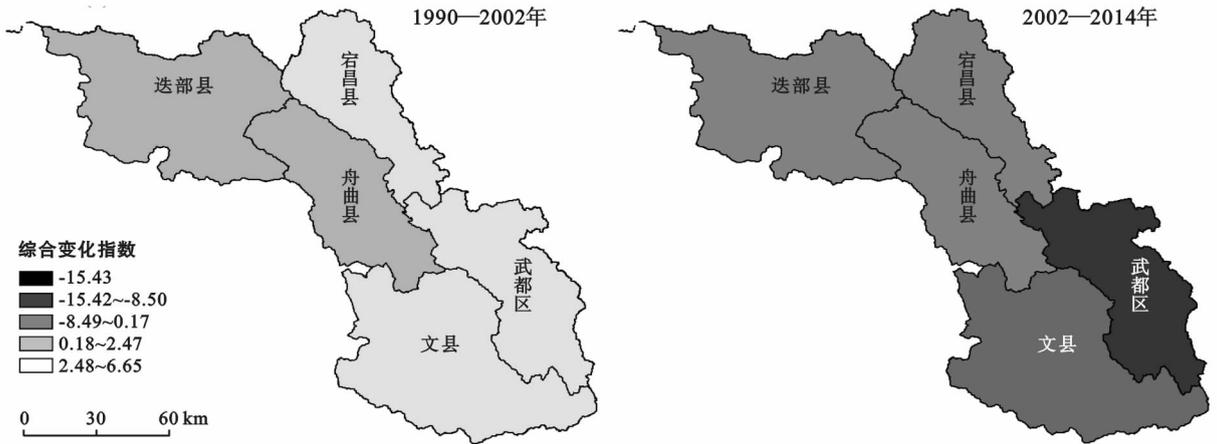


图3 甘肃省白龙江流域1990—2014年各县(区)土地利用程度变化

## 3 讨论与结论

1990—2014年人类活动影响下的甘肃白龙江流域土地利用变化速度大幅增加;1990—2002与2002—2014期间土地利用类型的主要转移方向相反,由前期的草地转耕地、林地转草地转变为后期的耕地转草地、草地转林地;土地利用开发程度先强后弱。这说明流域人类活动下的各土地利用类型间转移明显,人类活动对土地的利用由简单索取开发型转变为保护与生态建设型的利用方式,从破坏性、粗放式和低利用效率向保护性、集约式和高利用效率发展。

土地利用变化由多种因素共同作用产生,如1990—2002年,人口数量快速增长,在农业科技欠发达的条件下,人类仅能通过开垦荒地和毁林来进行农业扩张,以满足人类基本的生存和发展,相应的也会出现过度放牧和滥砍滥伐的现象,在这样的人类活动驱动下,流域土地利用呈现耕地面积增加,林地和草地面积减少的主要特点,如此粗放式的土地利用方式造成该时段流域内生态环境破坏严重;2002—2014年,人口数量虽继续增加,但流域内生态环境却逐渐恢复,这主要与退耕还林(还草)政策、天然林保护工程、长江流域防护林体系工程建设、公益林工程建设等大型生态建设工程的实施密切相关,此外,科学技术的进步、产业结构调整、移民搬迁与安置、新农村建

设等也在一定程度上影响着流域的人类活动,在人类活动的影响下,流域土地利用呈现耕地面积大减,林地面积大增的主要特点。这与其他干旱区土地利用变化驱动因子是人口、政策、经济和科技的结论一致<sup>[20-21]</sup>。

随着国家政府部门对生态恢复工程的逐渐重视,以及近年来依旧出现的草场退化、土壤沙漠化和盐碱化等生态环境问题,深入探讨区域内土地利用变化与人类活动的响应关系成为土地利用变化研究中的重要分支。通过此研究,可以从土地利用变化角度定性分析某一时段的人类活动情况,在完全明晰人类活动对土地利用甚至是生态环境影响的前提下,所制定的一系列生态恢复政策才更具可操作性。值得一提的是,人类活动的定量化分析及人类活动的调控幅度研究将是下一步的深入探讨突破的重点。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Rounsevell A, Pedrolí G B M, Erb K H, et al. Challenges for land system science[J]. *Land Use Policy*, 2012, 29(4):899-910.
- [2] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *地理学报*, 2014, 69(1):54-63.
- [3] Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4):997-1027.

- [4] Lambin E F, Geist H J, Lepers E. Dynamics of Land-use and land-cover change in tropical regions[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2003, 28(1): 205-241.
- [5] Goldewijk K, Ramankutty N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets [J]. *GeoJournal*, 2004, 61(4):335-344.
- [6] 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(6): 645-652.
- [7] Jonathan A F, Ruth D F, Gregory P A, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [8] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析[J]. *中国科学(D): 地球科学*, 2002, 32(12):1031-1040.
- [9] Eduardo C R, Van Butsic, Volker C. Radeloff, et al. Technology or policy? Drivers of land cover change in northwestern Spain before and after the accession to European Economic Community [J]. *Land Use Policy*, 2015, 45:18-25.
- [10] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(12):1411-1420.
- [11] 吕立刚, 周生路, 周兵兵, 等. 1985 年以来江苏省土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7):1086-1093.
- [12] 王三, 赵伟, 黄春芳. 基于遥感的重庆市土地利用动态变化研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(2):250-256.
- [13] 魏晓华, 孙阁. 流域生态系统过程与管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009:1-26.
- [14] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [15] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1):81-87.
- [16] 宋开山, 刘殿伟, 王宗明. 1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力[J]. *地理学报*, 2008, 63(1):93-104.
- [17] 冯永玖, 韩震. 基于遥感的黄浦江沿岸土地利用时空演化特征分析[J]. *国土资源遥感*, 2010(2):91-96.
- [18] 全斌. 土地利用覆盖变化导论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [19] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究: 基于卫星遥感数据[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(3):229-239.
- [20] 马晴, 李丁, 廖杰, 等. 疏勒河中下游绿洲土地利用变化及其驱动力分析[J]. *经济地理*, 2014, 34(1):148-156.
- [21] 雷诚, 张永福. 土地利用变化及驱动因素分析: 以新疆乌苏市为例[J]. *新疆农业科学*, 2009, 46(2):403-409.

(上接第 131 页)

#### [参 考 文 献]

- [1] Caine N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows[J]. *Geografiska Annaler*, 1980, 62(1/2):23.
- [2] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, 98(3):239-267.
- [3] Keefer D K, Wilson R C, Mark R K, et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall [J]. *Science*, 1987, 238(4829):921-924.
- [4] Chan R K S, Pun W K. Landslip warning system in Hongkong[J]. *Geotechnical News*, 2004, 22(4):33-35.
- [5] 姚学祥, 徐晶, 薛建军, 等. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(4):97-102.
- [6] 谢正伦, 陆源忠, 游保杉, 等. 泥石流发生临界降雨线设定方法之研究[J]. *中华水土保持学报*, 1995, 26(3):167-172.
- [7] 詹钱登, 李明熹, 土石流发生降雨警戒模式[J]. *中华水土保持学报*, 2004, 35(3):273-283.
- [8] Tang Chuan, Asch T W J W, Chang Ming, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, Southwestern China: The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms[J]. *Geomorphology*, 2012, 139/140(2):559-576.
- [9] 郭晓军, 范江琳, 崔鹏, 等. 汶川地震灾区泥石流的诱发降雨阈值[J]. *山地学报*, 2015, 33(5):579-586.
- [10] 周伟, 唐川, 周春花. 汶川震区暴雨泥石流激发雨量特征[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5):650-655.
- [11] Zhou Wei, Tang Cuan. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, Southwestern China[J]. *Landslides*, 2014, 11(5):877-887.
- [12] Brunetti M T, Peruccacci S, Rossi M, et al. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(3):447-458.
- [13] 赵衡, 宋二祥. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(5):1481-1487.
- [14] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1):2808-2812.
- [15] 胡娟, 闵颖, 李华宏, 等. 云南省山洪地质灾害气象预报预警方法研究[J]. *灾害学*, 2014, 29(1):62-66.