doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.017

基于改进稳定映射法的土地利用/覆被变化轨迹分析

王世东[1]　冯正英[1]　余　洋[1,2]　张合兵[1]

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 以丹江流域(河南段)2002—2017 年 16 个时相的 Landsat TM/OLI 和 HJ-1A CCD 影像为数据源,提取土地利用变化图谱,提出基于改进稳定映射法的土地利用/覆被变化(Land use/cover change,LUCC)轨迹分析方法,推导出稳定映射的相似性、变化次数、多样性(Similarity/Turnover/Diversity,STD)指标与时相数的关系式;将变化轨迹划分为稳定型、渐变型、非连续渐变型、循环型和波动型 5 个一级类轨迹,并进一步细分为二级和三级轨迹类型。在此基础上,结合土地利用动态度等定量模型和景观指数对研究区变化轨迹进行总体特征和时空变化分析。结果表明,在 2002—2017 年间,研究区耕地显著减少,建设用地和水域持续增加,林地、草地受"退耕还林还草"政策影响变化较为复杂,裸地相对稳定;研究区土地利用变化主要由耕地向建设用地和水域转化;由于丹江口库区建设和南水北调中线工程的实施,其水域面积由 218.60 km^2 增长到 400.31 km^2;受自然地形影响,研究区北部山区和丘陵地带的林地保护较好,而丘陵与平原过渡地带占研究区总面积 5.85% 的林地、耕地和草地出现了显著的相互转化。本研究可为研究区土地资源的可持续利用、生态环境保护及水源地保护提供数据支撑和决策依据。

关键词: 丹江流域; 土地利用/覆被变化; 长时序遥感; 稳定映射; 变化轨迹分析

中图分类号: P208　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0152-11　　**OSID**:

Land Use/Cover Change Trajectory Analysis Based on Improved Stable Mapping Method

WANG Shidong[1]　FENG Zhengying[1]　YU Yang[1,2]　ZHANG Hebing[1]

(1. *School of Surveying and Land Information Engineering*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 454000, *China*
2. *China Geological Environmental Monitoring Institute*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: As important water source of the Middle Route Project of the South-to-North Water Diversion in China, the protection and construction of ecological environment in water supply area is top priority of sustainable development of ecological environment in China. With the implementation of water diversion project, the land use and cover situation in Danjiang River Basin would be inevitably changed. Based on data source of 16 phases of Landsat TM/OLI and HJ-1A CCD image in 2002—2017 in the study area, the land use change map was extracted, the land use/cover change (LUCC) trajectory analysis method of improved stable mapping method was established, and the relationship between similarity, turnover and diversity (STD) index of stable mapping and the number of time phases was derived; the change track was divided into five first level track processes: stable, gradual, discontinuous gradual, cyclic and fluctuating, and further subdivided into two and three level track processes. On this basis, combined with quantitative models such as land use dynamic degree and landscape index, the overall characteristics and spatiotemporal changes of the study area were analyzed. The results showed that: during 2002—2017, the cultivated land in the study area was decreased significantly, the construction land and water area continued to increase, the forest land and grassland were firstly decreased and then increased, and the bare land was relatively stable; the main flow of land use change in the study area was concentrated in the construction land and water area, which was transformed from cultivated land; at the same time, due to

收稿日期: 2020-05-27　修回日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801318)、河南省科技攻关项目(192102310038、192102310270)、中国地质调查局地质调查项目(DD20190701)和河南省国土资源科研项目(豫政采(2)20190450-7)

作者简介: 王世东(1978—),男,副教授,博士,主要从事资源环境遥感、土地利用与土地复垦研究,E-mail: wsd0908@163.com

通信作者: 余洋(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事自然资源综合开发利用和国土空间生态修复研究,E-mail: yuyang2005@139.com

the construction of Danjiangkou reservoir area and the implementation of the Middle Route Project of South to North Water Diversion, the water area was increased from 218.60 km^2 to 400.31 km^2 in length. Affected by the natural topography, the woodland in the northern mountainous and hilly areas of the study area was well protected, while the woodland, cultivated land and grassland in the transition zone between hills and plains had significantly transformed each other, accounting for 5.85% of the total area of the study area. The results can provide data support and decision-making basis for the sustainable utilization of land resources, protection of ecological environment and protection of water sources.

Key words: Danjiang River Basin; land use/cover change; long time series multisource remote sensing; stability mapping; variation trajectory analysis

0　引言

近年来,国内外学者较多利用转移矩阵[1-2]和土地利用动态变化模型[3-5]对土地利用/覆被动态变化进行研究,分析土地利用和覆被的数量变化、程度变化及空间分布。上述研究大多是基于单期或相邻两期数据的对比揭示在多时间序列上土地利用变化的时空规律。构建土地利用变化轨迹模型不仅可以得到其时空变化特征,还可以通过各种轨迹分析方法[6-10]分析其转移和流向[11],从轨迹过程中寻求变化规律,揭示时间序列上土地利用/覆被变化的时空动态演变特征[12]。

土地利用/覆被变化研究是一个长期动态过程,以上研究较多只是刻画了一个相对“连续”时间尺度[13-14]的变化,若两期间隔时间较长,势必会割裂其连续变化,破坏变化规律中的过程完整性。因此,在遥感影像的支持下,研究基于连续时间尺度的土地利用/覆被变化轨迹,对于精细的土地利用动态监测及土地资源的可持续利用具有重要意义。当时间序列数据较多时,土地利用/覆被变化轨迹更加繁杂,轨迹提取和时空演变分析愈加困难,因此需要一种针对多时间序列数据的轨迹提取和分析方法。目前,稳定映射变化轨迹法已广泛应用于各领域的轨迹变化中,但该方法在土地利用变化方面的研究较少,尤其是针对多时间序列土地利用/覆被变化的研究。本文结合 ArcGIS 技术,基于长时序遥感数据和改进稳定映射法的土地利用/覆被变化(Land use/cover change,LUCC)轨迹分析方法,研究时相数与稳定映射变化轨迹 STD 指标的对应关系,为长时序连续时间尺度的土地利用变化轨迹提取和变化轨迹类型划分提供借鉴。

丹江流域水资源丰富,位于河南省淅川县的丹江口水库是南水北调中线工程的主要水源地[15],自 2003 年南水北调工程实施以来,不仅改变了丹江口库区水资源的自然地理分布,同时受人类活动影响,丹江口库区的人口密度增大、土地开发利用强度增加、环境资源过度消耗等也使得丹江口库区的土地利用/覆被变化更加显著[16]。鉴于此,本文以丹江流域(河南段)为例,选用 2002—2017 年 16 期 Landsat TM/OLI 及 HJ-1A CCD 遥感影像数据,提取连续时间尺度的土地利用变化图谱,建立改进稳定映射法的 LUCC 轨迹分析方法,提取变化轨迹,并对轨迹类型进行划分,同时结合土地利用动态度等定量模型和景观指数,分析研究区 16 年间土地利用和覆被的转移流向总体特征和时空变化规律。

1　研究区概况

丹江流域(河南段)位于河南省西南部,地理坐标为东经 110°35′~111°58′,北纬 32°30′~34°1′,南接湖北省,西临陕西省,总面积约为 8 419 km^2。丹江干流自淅川县荆紫关入境,汇水总面积占整个研究区的 3.11%,流经河南省洛阳市、南阳市和三门峡市,包含三门峡市的卢氏县,洛阳市的栾川县部分区域,南阳市的西峡县、淅川县、内乡县以及邓州市部分区域,其地理位置如图 1 所示。

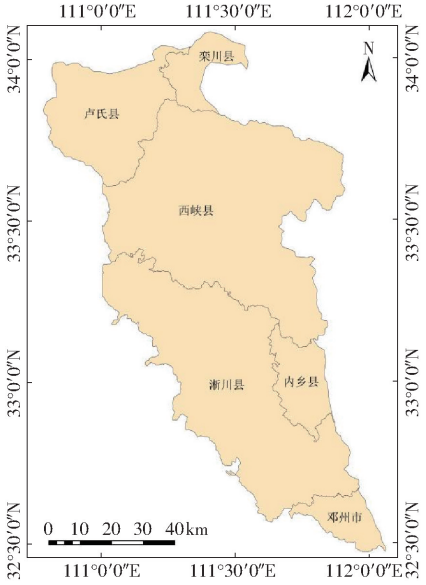


图 1　研究区地理位置图

Fig. 1　Geographical location map of study area

研究区具有典型的流域特色,整体地形起伏较大,地势由西北向东南倾斜,西北部环绕伏牛山脉,东南部依次为岗地和冲击平原区,属亚热带向暖温

带过渡的季风性气候。研究区景观分布呈规律性,林地主要分布于研究区西部和北部的山地丘陵地带,大部分为块状山林,且受河流切割使得地貌起伏跌宕;耕地主要分布于东南部的平原地带;水域主要位于西南部淅川县境内的部分丹江口库区,是南水北调中线工程的主要水源地。2003 年南水北调中线工程正式开工,2005 年丹江口大坝开始实施加高加固,正常蓄水水位由 157 m 提升至 170 m,库容由 1.745×10^{10} m^3扩大至 2.905×10^{10} m^3,至 2014 年底南水北调中线工程正式通水。南水北调中线工程实施及建成后,优化了我国水资源配置,有力支撑了水资源的社会经济发展,但对于丹江口库区的生态质量、土地资源可持续利用及社会经济发展都产生了重要影响。因此,以丹江流域(河南段)为例,基于长时序遥感数据,研究土地利用/覆被变化轨迹,揭示土地利用时空演变规律,为研究区土地可持续利用、生态环境建设以及水源地保护提供科学依据。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

采用单一遥感数据源往往难以支持长时间序列对土地变化轨迹分析的需求,为获得长时序多时相土地利用/覆被信息,选用 2002—2017 年共 16 期遥感影像数据,分别为 Landsat TM(2002—2011 年)、HJ-1A CCD(2012 年)、Landsat OLI(2013—2017 年),其中选用 Landsat TM 影像的 1~5 波段和第 7 波段、HJ-1A CCD 相机波段和 Landsat OLI 影像的 1~7 波段,从而保证所用影像的分辨率均为 30 m,其他数据包括研究区 2015 年土地利用变更数据库和道路水系等。

为保证长时序遥感影像对空间叠加及土地利用分类的准确性,需要对影像进行辐射定标、校正、波段组合等预处理[17],从而减少光照、大气等对不同时相影像造成的误差,同时也可以提高土地利用/覆被信息的解译精度。本研究在对长时序遥感影像进行预处理后,采用统计特征分析、主成分分析和相关分析等方法,利用相关系数矩阵、特征向量和特征值,按照最佳波段组合原则[18],得到适合研究区土地利用分类的最佳波段组合:Landsat TM(5、4、3 波段)、HJ-1A CCD(1、2、3 波段)、Landsat OLI(7、5、4 波段)。

根据土地利用一级类型划分体系和丹江流域(河南段)实际土地利用特征,将土地利用类型划分为水域、裸地、耕地、林地、草地、建设用地 6 类。结合土地利用变更数据库、Google 历史影像及实地勘探,每期影像均选择两套样本点,分别用于分类和精度验证[19]。采用支持向量机分类和人工目视解译法,获取研究区 16 年间土地利用/覆被分类结果,如图 2 所示。经验证,分类总体精度不小于 90.43%,Kappa 系数达到了 0.84,满足分类精度的要求。影像数据分类完成后,对地类属性做重分类处理,将水域、裸地、耕地、林地、草地、建设用地依次重编码为 1、2、3、4、5、6,为后续研究区多时相土地利用变化图谱的提取提供数据准备。

2.2 土地利用变化图谱的提取

土地利用变化轨迹的建立等同于多时相遥感数据土地空间单元变化图谱的提取,史培军等[1]提出了土地利用变化空间表达方法,变化图谱提取公式为

$$C_{i\times j}=10^{n}A_{ki\times j}+10^{n-1}A_{(k+1)i\times j}+10^{n-2}A_{(k+2)i\times j}+\cdots+10^{n-n}A_{(k+n)i\times j} \tag{1}$$

式中 $A_{ki\times j}$——k 时刻研究区土地利用图谱

i——研究区行数

j——研究区列数

n——时相数

$C_{i\times j}$——$n+1$ 个时相的土地利用变化图谱

变化图谱表现了由 k 时刻到 $k+n$ 时刻的土地利用变化类型和空间分布,该方法适用于土地利用类型小于 10 的情况。

较多学者均采用土地利用变化空间表达方法,并结合 ArcGIS 技术的栅格运算功能,构建长时序相对“连续”的土地利用/覆被变化轨迹,时相数均为 4~6 个[20-22]。在本研究中,需要构建丹江流域(河南段)2002—2017 年共 16 个时相的土地利用变化轨迹,变化图谱在影像栅格中表示为 16 位的属性值,例如某空间单元初始时相的土地利用类型为水域,并从始至终未发生变化,则其变化图谱的栅格属性值为 1 111 111 111 111 111。但由于栅格运算功能只能使用系统字段进行计算,该字段值类型为长整型,取值范围为 -2 147 483 648~2 147 483 648,最多只能满足 10 个时相的土地利用变化图谱的表达。因此,在本研究中将 16 个时相的土地利用分类结果通过转换工具转换为矢量,使得每一个土地空间单元对应一个矢量点,采用空间连接和字段计算器功能,代入式(1),再将矢量点转换为栅格,此时栅格数据中参与运算的字段类型为字符串,字段值即为研究区 16 个时相的土地利用变化图谱信息。

2.3 改进稳定映射变化轨迹分析

AMY 等[23]基于 6 时相 23 个随机地点的土地利用变化结果,通过计算研究区长时序多时相变化图谱中的 STD 指标,即研究时段内各土地空间单元所经历演变过程的变化次数(Turnover,T)、相似性

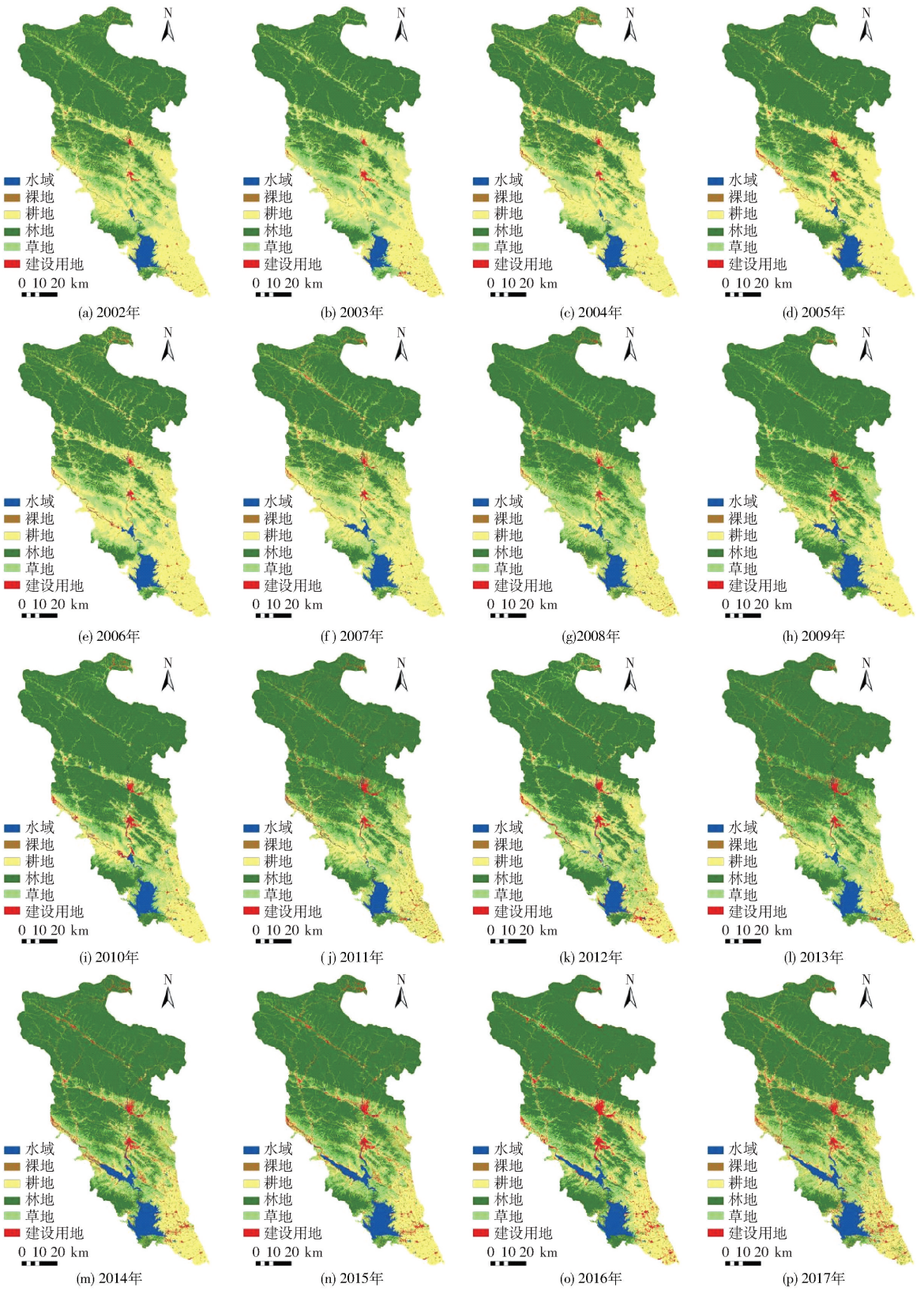


图 2　2002—2017 年研究区土地利用分类图

Fig. 2　Land use status maps of study area

(Similarity, S) 和多样性(Diversity, D) 来综合反映土地利用轨迹变化过程,从而提出了土地利用/覆被长时序多时相稳定映射变化轨迹分析方法。其中, S 表示某土地空间单元在研究时段内经历的相同土地利用类型的数量; T 表示研究时段内该土地空间单元在相邻时间段发生变化的次数; D 表示某土地空间单元在研究时段内经历的不同土地利用类型的数量。

STD 指标是稳定映射变化轨迹模型的基础,是划分研究区土地利用变化轨迹类型的关键。参考

AMY 等[23]提出的土地利用变化轨迹的 STD 判定原则,本研究结合长时序遥感数据变化图谱信息,推导计算出稳定映射 STD 指标与时相数的关系式,并根据研究区的实际情况,提出适合研究区的基于改进稳定映射法的 LUCC 变化轨迹分析方法。

2.3.1 STD 指标计算

土地利用变化轨迹的种类受研究时相数和土地利用类型数量的影响,令研究时相数为 n,土地利用类型数为 m,则可能出现的变化轨迹有 m^n种。本研究参考土地利用类型一级划分体系,将研究区划分为 6 种土地利用类型,选用连续的 16 个时相的土地利用结果,则可能出现的变化轨迹有 6^{16}种,在应用稳定映射变化轨迹 STD 判定方法时,各土地空间单元演变过程中经历变化次数、多样性和相似性 3 个指标的计算更加复杂。由稳定映射 STD 指标的原理可知,长时序土地利用变化轨迹中,研究时段内某土地空间单元在相邻时间段发生变化的次数决定着该土地空间单元所经历的相同和不同土地利用类型的数量,即其所经历演变过程的变化次数 T 决定着该条变化轨迹上土地利用类型的相似性和多样性。而随着研究时段内时相数的增多,其变化轨迹中所经历演变过程的变化次数也越来越多,则土地利用类型就具有更高的相似性和多样性。本研究发现,时相数量的变化与变化次数、多样性、相似性 3 个指标的计算具有一定的对应关系,由此推导出在土地利用类型为 6 的情况下,时相数与 STD 指标的计算关系式(表 1),并通过随机抽样验证了其正确性。表 1 中,Ceil 为向右取整函数。

表 1 长时序土地利用变化轨迹的 STD 指标

Tab. 1 STD index for long time series land use change track

变化次数 T	多样性 D	相似性 S
1	2	$\left(\frac{n}{2}-\frac{1}{2}\right)\sim(n-1)$,$n$ 为奇数 $\frac{n}{2}\sim(n-1)$,n 为偶数
(1,6)	$[2,T+1]$	$\text{Ceil}\left(\frac{n}{T+1}\right)\sim\left(n-\frac{T+1}{2}\right)$,$T$ 为奇数 $\text{Ceil}\left(\frac{n}{T+1}\right)\sim\left(n-\frac{T}{2}\right)$,$T$ 为偶数
≥6	[2,6]	$\text{Ceil}\left(\frac{n}{6}\right)\sim\left(n-\frac{T+1}{2}\right)$,$T$ 为奇数 $\text{Ceil}\left(\frac{n}{6}\right)\sim\left(n-\frac{T}{2}\right)$,$T$ 为偶数

将本研究中 $n=16$ 代入表 1 的范围中,可以计算出研究区土地利用变化过程中,经历不同变化次数的土地利用变化轨迹所包含的地类多样性和相似性,从而得到研究区 16 个时相的土地利用稳定映射 STD 指标(表 2),为下一步土地利用变化轨迹类型划分提供数据基础。

表 2 研究区 16 个时相的土地利用变化 STD 指标

Tab. 2 Changes in soil utilization STD index at 16 in study area

变化次数 T	多样性 D	相似性 S
0	1	16
1	2	8、9、10、11、12、13、14、15
2	2、3	6、7、8、9、10、11、12、13、14、15
3	2、3、4	4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14
4	2、3、4、5	4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14
5	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13
6	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13
7	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9、10、11、12
8	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9、10、11、12
9	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9、10、11
10	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9、10、11
11	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9、10
12	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9、10
13	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9
14	2、3、4、5、6	3、4、5、6、7、8、9

2.3.2 改进的土地利用变化轨迹分析方法

结合丹江流域(河南段)实际土地利用变化情况,本研究提出了一种基于长时序遥感的土地利用变化轨迹的 STD 判定方法(表 3)。将一级变化轨迹类型划分为稳定型、渐变型、非连续渐变型、循环型和波动型 5 类。由于研究时序较长,研究区稳定土地空间单元会存在因土地利用规划占地或分类误差等影响而在某一年产生突变,但却长期保持该种土地利用类型的情况,因此本研究将稳定型土地利用变化轨迹划分为持续稳定型和长期保持型两类二级过程;同时,针对渐变型土地利用变化轨迹,又根据变化发生时期的早晚将其划分为早期变化后期稳定、中期变化和早期稳定后期变化 3 类二级过程;其次,根据研究区实际土地演变情况和 STD 指数,将循环型土地利用类型又划分为 AB 类循环和 ABC 类循环。最后,根据土地利用类型,将持续稳定型和长期保持型分别划分为持续稳定林地、持续稳定草地、持续稳定水域、持续稳定耕地、持续稳定裸地、持续稳定建设用地和长期保持林地、长期保持草地、长期保持水域、长期保持耕地、长期保持裸地、长期保持建设用地 6 类三级过程。

2.4 土地利用变化轨迹类型分析方法

传统的稳定映射变化轨迹分析方法是根据研究时段内区域土地利用变化的轨迹类型,分析其不同轨迹类型的面积变化和分布特征。近年来,国内外学者在分析其轨迹类型的基础上,结合定量分析模

表 3　研究区土地利用变化轨迹的 STD 判定方法

Tab. 3　STD determining method of change track of soil use in study area

一级类别	二级类别	说明	变化次数	多样性	相似性	栅格属性值举例
稳定型	持续稳定型	没有变化	0	1	16	1111111111111111
	长期保持型	一类别长期保持稳定，但其中一年突变为另一类	2	2	15	1111211111111111
渐变型	早期变化后期稳定	两种类型间只在前 6 个时相内发生一次变化	1	2	10、11、12、13、14、15	11122222222222222
	中期变化	两种类别间只在中期发生一次变化	1	2	8、9	1111111222222222
	早期稳定后期变化	两种类别间只在后 6 个时相内发生一次变化	1	2	10、11、12、13、14、15	1111111111112222
非连续渐变型		可能表现出一些周期性变化但趋势不明显	2	2	8、9、10、11、12、13、14、15	111112222111111
			4	3	7、8、9、10、11、12、13	11122333311122222
循环型	A 类/B 类	周期性变化明显	3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15	2	8、9、10、11、12、13、14	12121212121212
	A 类/B 类/C 类	周期性变化明显	5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15	3	6、7、8、9、10、11、12	11122312233311123
波动型		更高的多样性/更多类别之间的频繁变化				1222521122233446

注：波动型 STD 对应值为除去上述 4 类一级类型的其他所有值。

型和景观指数进行了更深层次的土地利用变化轨迹的演变特征分析。定量分析模型可以反映研究时段内区域的单一土地利用类型和综合土地利用类型的变化量、变化幅度和变化状态等特征，景观指数可以计算景观单元时空变化并反映景观格局结构等空间分布特征，其中景观水平上的景观格局分析能够反映出整个研究区的景观格局的演变规律[24-26]。本文将研究区土地利用变化轨迹划分为 5 种轨迹类型，结合其土地利用轨迹类型特征，选用单一土地利用动态度和综合动态度两个定量模型以及景观水平上的面积（CA）、面积占比（PLAND）、斑块密度（PD）、最大斑块指数（LPI）、散布与并列指数（IJI）和聚集度（AI）6 种常用的景观指数，将变化轨迹相同的斑块看作同一种景观类型，利用 ENVI 软件和 Fragstats 软件，对研究区土地利用变化轨迹类型从动态变化总体特征和时空变化规律两方面进行系统分析。

表 4　研究区土地利用类型面积统计

Tab. 4　Statistics of land use type area in study area

km^2

年份	水域	裸地	耕地	林地	草地	建设用地
2002	218.60	19.29	2 474.54	4 754.70	845.52	106.35
2003	192.33	12.69	2 317.68	4 581.41	1 182.24	132.65
2004	224.98	16.01	2 771.08	4 538.25	707.91	160.77
2005	250.17	11.21	2 715.07	4 903.00	396.59	142.96
2006	256.55	12.57	2 605.94	4 481.16	901.10	161.68
2007	296.85	20.22	2 497.26	4 561.58	876.61	166.48
2008	262.10	15.63	1 747.84	5 107.92	1 089.76	195.75
2009	300.50	15.32	1 730.34	5 304.18	906.18	162.48
2010	256.21	15.15	1 653.09	5 464.94	840.29	189.32
2011	231.04	18.80	1 535.11	5 315.08	1 032.22	286.75
2012	254.32	16.08	1 569.49	5 301.70	1 011.51	265.90
2013	288.29	15.89	1 310.49	5 322.35	1 186.33	295.65
2014	385.14	15.85	1 387.43	5 235.66	1 051.53	343.39
2015	393.05	15.25	1 356.94	5 131.24	1 184.27	338.25
2016	381.87	18.73	1 433.05	5 423.72	798.35	363.28
2017	400.31	24.03	1 562.60	4 983.42	1 031.96	416.68

3　结果与分析

3.1　土地利用/覆被动态变化总体特征

在 2002—2017 年间，研究区各土地利用类型的组成结构和面积均发生了显著变化。从土地利用类型的组成结构来看，研究区地势从西北到东南依次为山地、丘陵、垄岗和平原，研究区的土地利用状况主要以林地和耕地为主；从土地利用类型的面积变化来看（表 4），随着研究区可持续发展进程加快以及南水北调中线工程的实施，2002—2017 年间，研究区土地利用变化总体趋势主要以耕地向建设用地转化以及水域面积不断增加为主。具体表现为：①耕地面积在 2004—2011 年间持续减少，但 2004 年耕地面积较 2003 年增长约 453.40 km^2，主要原因为 1999—2003 年间，城镇、市区的迅速扩张和乡镇企业的突出发展占用了大量耕地，国家在该阶段相继出台了一系列保护耕地的法律法规，通过土地开发、复垦、整理等措施增加耕地面积[27]。2004 年

后,耕地面积逐年稳定减少。②林草地面积变化趋势较为复杂,2002—2004 年呈现下降趋势,但在 2006 年后林草地面积有小幅度上升,主要因为该阶段“退耕还林还草”政策对其有较大的影响。③建设用地面积稳步增加,由 2002 年的 106.35 km^2增加至 2017 年的 416.68 km^2,共增加了 310.33 km^2。④水域面积总体呈上升趋势,原因在于 2003 年底南水北调中线工程开始实施,为使调水工程顺利进行,2005 年开始对丹江口大坝进行加高加固处理,至 2014 年库区面积有了较为明显的增加。在 2010—2012 年期间,水域面积有所减少,与该时期丹江上游季节性降水和丹江口的人工调蓄有一定关系[28-29]。

对比连续 16 年间研究区各土地利用类型的年变化率和综合土地利用动态度(图 3)可以看出:①2002—2008年各土地利用类型的年变化率较大,这期间内研究区的土地利用类型之间的转变尤为频繁。②建设用地在研究时段内基本保持正向增长趋势,最大年增长率为 51.00%,而耕地基本保持负向减少。③年变化率的计算受前一年度土地利用类型面积的影响,因此可以看到 2005—2006 年草地的年增长率为 127.00%,主要原因为 2003—2005 年出台的一系列“复垦耕地”政策导致草地面积减少。④综合土地利用空间动态度曲线定量描述了研究区土地利用类型的变化幅度和活跃程度。由图 3 可以看出,研究初期丹江流域(河南段)各土地利用类型转换频繁,其中 2008 年土地利用变化最为剧烈;2009—2015 年研究区综合土地利用动态度均在 8%以下,其土地利用类型变化幅度较小;2016 年后综合土地利用动态度有明显增加,表明这两年研究区土地利用类型变化较为活跃。

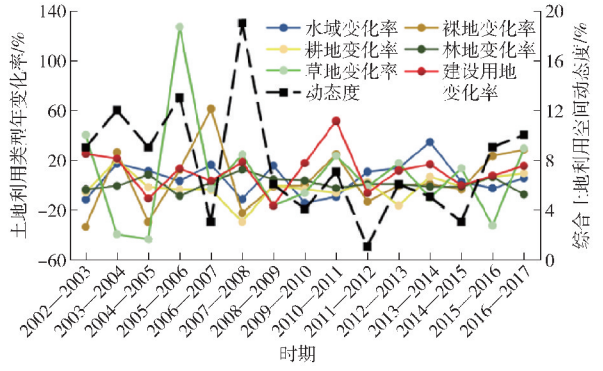


图 3 研究区 2002—2017 年土地利用/覆被定量分析折线图

Fig. 3 Quantitative analysis of land use/covers in study area in 2002—2017

3.2 土地利用/覆被变化轨迹类型空间分布

基于改进稳定映射法的变化轨迹分析方法,按照土地利用变化轨迹动态过程将研究区变化轨迹划分为稳定型、渐变型、非连续渐变型、循环型和波动型 5 个一级类,并根据研究区实际土地利用情况划分二级和三级轨迹类型,然后结合 6 个常用景观指数,从空间构型上对研究区土地利用变化轨迹作深入分析(表 5)。其构成特征如下:

(1)稳定型

此类轨迹类型表示自研究初期至研究末期,研究区土地利用类型从未发生过变化,或在研究期内长期保持某种地类的图谱单元。本研究中稳定型面积占比为 61.80%。此种轨迹类型可以细分为持续稳定型和长期保持型。

持续稳定过程表示在连续 16 年间一直保持同一种土地利用类型的演变过程。结合图 4a 可以看出,在该种轨迹类型中,持续稳定林地面积最大,占研究区总面积的 47.85%,主要分布于研究区北部和西北部的山地丘陵地带,其次为持续稳定耕地和持续稳定水域,面积占比分别为 4.85% 和 2.03%,分别位于研究区东南部的平原地带和南部的丹江口库区。同时,分析最大斑块指数(LPI)和聚集度(AI)可知,持续稳定林地的最大斑块景观占比最高,为 14.01%,聚集度为 94.02%,说明持续稳定林地的景观破碎度较低,斑块聚集程度较高,林地的土地利用状况较为稳定;草地的最大斑块占比最小,趋近于 0,聚集度为 32.45%,说明该种地类景观破碎度高,主要以细碎斑块为主,土地利用变化活跃。裸地为过渡性土地利用类型,其面积占比很小,持续稳定裸地和长期保持裸地类型占比趋近于 0,因此不对其进行景观指数分析。

长期保持过程是指某土地空间单元在研究期内土地利用类型原则上未发生变化,但由于研究时相较多,可能因为土地利用规划占地或分类结果存在误差等原因导致某一时刻地类发生一次变化,但仍长期保持该种地类的演变过程。结合图 4b,此类轨迹斑块面积占研究区总面积的 6.47%,主要集中在持续稳定型轨迹斑块附近,并在持续稳定型斑块周围离散分布。因此,长期保持型轨迹的 AI 值和整体水平 AI 值都偏低。

(2)渐变型

渐变型土地利用轨迹变化过程表示在研究区内土地利用类型只发生一次变化,即从一类转换为另一类的过程。该类型图谱单元变化次数为 1,多样性为 2,占研究区总面积的 7.32%。根据变化时期的早晚,又将 2002—2007 年期间发生的变化归为早期变化后期稳定,2008—2011 年期间发生的变化归为中期变化,将 2012—2017 年期间发生的变化归为早期稳定后期变化。结合图 4c 和表 6 可以看出,

表 5　研究区土地利用变化轨迹景观指数统计

Tab. 5　Land-use change track landscape index statistics

一级轨迹	二级轨迹	三级轨迹	类型面积/km²	面积占比/%	斑块密度/(个·km⁻²)	最大斑块指数/%	散布与并列指数/%	聚集度/%
稳定型	持续稳定型	持续稳定水域	170. 92	2. 03	3. 50	1. 89	33. 47	96. 71
		持续稳定耕地	408. 72	4. 85	69. 54	0. 38	31. 18	70. 67
		持续稳定林地	4 028. 46	47. 85	4. 18	14. 01	28. 95	94. 02
		持续稳定草地	21. 49	0. 26	394. 10	0. 01	35. 72	32. 45
		持续稳定建设用地	28. 41	0. 34	62. 27	0. 08	33. 14	74. 34
		整体水平	4 658. 00	55. 33	12. 04	25. 32	60. 02	91. 66
	长期保持型	长期保持水域	3. 31	0. 04	486. 55	3. 26	59. 19	31. 46
		长期保持耕地	210. 34	2. 50	454. 28	0. 19	48. 25	30. 33
		长期保持林地	227. 32	2. 70	552. 30	0. 42	40. 18	23. 53
		长期保持草地	94. 07	1. 12	396. 74	0. 43	39. 73	33. 88
		长期保持建设用地	9. 30	0. 11	598. 03	0. 56	49. 88	22. 24
		整体水平	544. 34	6. 47	487. 94	0. 17	42. 03	27. 97
渐变型	早期稳定,后期变化		253. 71	3. 01	372. 45	1. 00	40. 06	38. 50
	中期变化		38. 25	0. 45	563. 78	0. 77	23. 18	24. 04
	早期变化,后期稳定		325. 12	3. 86	471. 01	0. 68	41. 19	30. 82
非连续渐变型			745. 82	8. 86	679. 48	0. 06	47. 98	18. 66
循环型	A 类/B 类	耕地草地循环	318. 92	3. 79	715. 09	0. 10	62. 28	15. 86
		耕地水域循环	41. 13	0. 49	70. 99	9. 71	23. 85	74. 37
		林地草地循环	173. 50	2. 06	553. 62	0. 14	47. 46	24. 56
		整体水平	533. 55	6. 34	634. 47	0. 63	51. 04	21. 93
	A 类/B 类/C 类		105. 23	1. 25	743. 69	0. 18	50. 36	15. 48
波动型			1 214. 97	14. 43	473. 81	0. 77	43. 52	37. 88

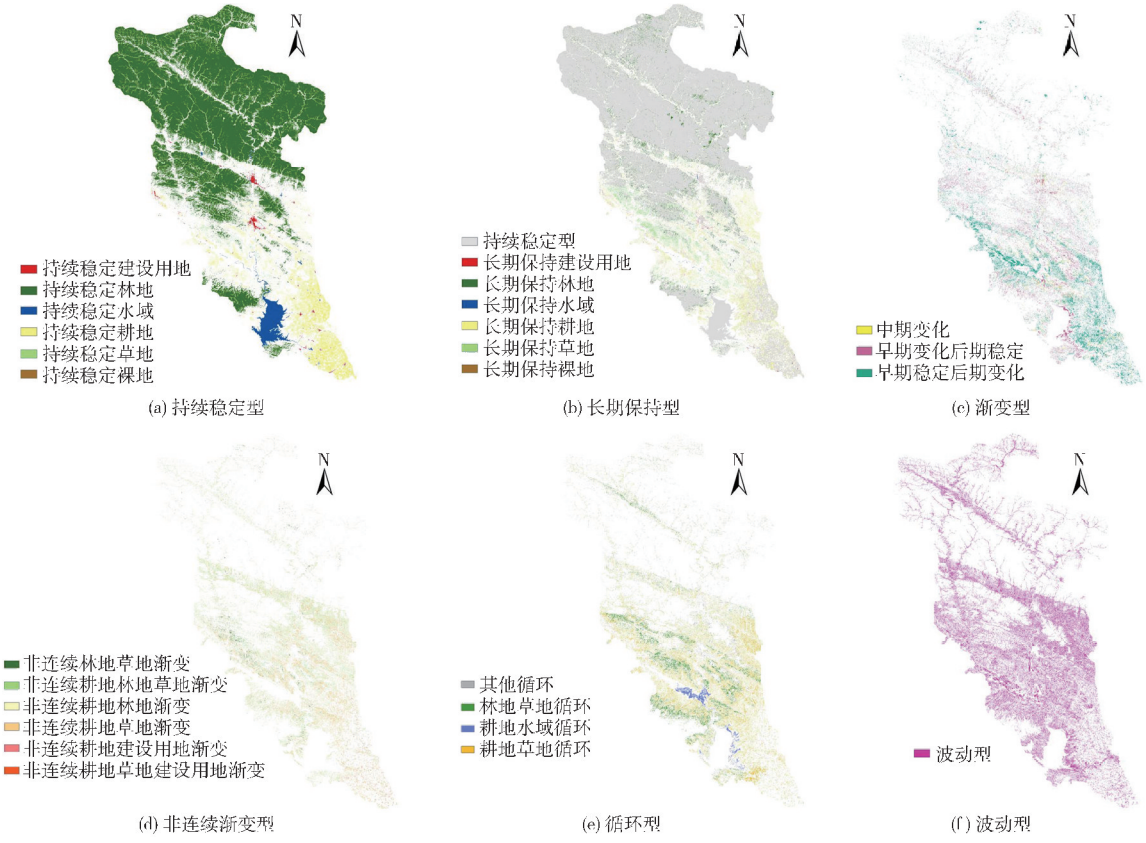


图 4　研究区土地利用变化轨迹的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution maps of land-use change trajectories

早期变化后期稳定的面积占比为 3.86%,主要分布在研究区中部、北部和西南部,转化为林地、草地的面积较多;中期变化的面积占比为 0.45%,主要转化为草地和建设用地;早期稳定后期变化的面积占比为 3.01%,主要分布在研究区东南部平原地带和丹江流域支流的流经区域,对应的土地利用流向分别为耕地向草地、建设用地和耕地向水域的转化。

表 6 渐变型土地利用类型转化面积统计

Tab. 6 Land use type conversion area statistics km^2

早期转化类型	面积	中期转化类型	面积	后期转化类型	面积
转化为水域	25.04	转化为水域	0.78	转化为水域	35.73
转化为裸地	0.38	转化为裸地	0.71	转化为裸地	38.09
转化为耕地	7.92	转化为耕地	0.39	转化为耕地	26.89
转化为林地	151.31	转化为林地	1.38	转化为林地	9.54
转化为草地	43.98	转化为草地	22.64	转化为草地	164.18
转化为建设用地	25.06	转化为建设用地	12.35	转化为建设用地	50.69

(3)非连续渐变型

非连续渐变型是表示 2 种或 3 种土地利用类型的周期性转化,但趋势不明显的土地利用轨迹过程,占研究区总面积的 8.86%。本研究提取出面积占比超过 0.30% 的变化轨迹如图 4d 所示,其中非连续耕地林地渐变和非连续耕地草地渐变共占此类型面积的 87.33%。结合表 5 中非连续渐变型 AI 值为 18.66%,说明该种轨迹类型由较多细碎小斑块组成,各个地类之间转换频繁。

(4)循环型

循环型轨迹变化过程是描述 2 种或 3 种土地利用类型间的相互转化,由于研究时序较长,时相较多,结合研究区实际土地利用状况,将该轨迹类型细分为两种地类间的循环转化和 3 种地类间的循环转化。经统计发现,耕地草地循环、耕地水域循环和林地草地循环的面积在该类循环中面积占比为 83.50%,因此主要针对这 3 种循环转化进行分析(图 4e)。其中耕地草地循环面积占比为 3.79%,从空间分布来看,主要分布在稳定型耕地和稳定型草地的交错区域;耕地水域循环主要分布在淅川县丹江口库区支流的径流区域,面积占比为 0.49%;林地草地循环面积占比为 2.06%,受季节和区域影响,主要分布在研究区山地的山脊、山谷以及丘陵和平原相接的区域。

(5)波动型

波动型土地利用轨迹变化过程具有更高的多样性,表达不同地类间的频繁转化,占研究区总面积的 14.43%。同时,因为波动型轨迹类型较多,本研究中仅将面积占比大于 0.03% 的轨迹类型选取出来。在此类轨迹变化过程中,图谱单元多样性为 3 的轨迹面积占该类总面积的 64.20%,即在波动型的轨迹变化过程中,主要是 3 种地类间的频繁转化。其中,涉及到耕地和草地的变化轨迹居多,说明在研究区连续 16 年的土地利用变化中,耕地草地的变化是较为活跃的。

综上所述,在 2002—2017 年期间,研究区土地利用流向主要是耕地转化为建设用地;林草转化和耕草转化较为频繁;同时,水域面积明显增大,与南水北调中线工程的实施和丹江口库区大坝的增高紧密相关。从研究区土地利用变化总体特征和时空变化规律可以看出,16 年来土地利用变化总体趋势主要以耕地向建设用地转化和水域面积不断增加为主,其中耕地面积由 2002 年的 2 474.54 km^2 减少至 2017 年的 1 562.60 km^2,建设用地面积和水域面积分别由 2002 年的 106.35 km^2 和 218.60 km^2 增加至 2017 年的 416.68 km^2 和 400.31 km^2,林草地在 16 年间面积变化较为复杂,呈现先减少后上升的趋势,主要受该阶段“退耕还林还草”政策的影响。综合分析 16 年间土地利用变化率可以得出,建设用地在研究时段内基本保持正向增长,这与 16 年间社会经济的快速发展和城镇、市区的迅速扩张有密切关系,同时 2008 年研究区综合土地利用动态度呈增加趋势,表明该年研究区土地利用类型的变化最为剧烈。研究区 2002—2017 年间稳定型轨迹面积占比最大,主要分布在研究区北部山区、丘陵地带林地、丹江口库区和东南部耕地等区域,达到 61.80%,说明研究区总体土地利用状况稳定,符合研究区土地利用实际情况。而地类转化频繁的区域主要位于丘陵与平原的过渡地带,林地、耕地和草地出现了显著的相互转化现象。

4 讨论

提取土地利用/覆被变化轨迹,以研究土地利用类型的转移和流向,揭示土地利用变化规律,从而分析时间序列中土地利用/覆被的时空演变特征[30-31]。但随着研究时间序列数据的增多,土地利用/覆被变化轨迹更加繁杂,轨迹提取更加困难。本

研究以丹江流域(河南段)为研究区,基于长时序遥感数据,提取土地利用变化图谱信息,并以改进的稳定映射变化轨迹分析方法将变化轨迹重分类,结合土地利用动态度等定量模型和景观格局指数,揭示研究区 2002—2017 年间土地利用类型的变化轨迹和时空演变规律,研究结果为土地资源可持续利用和水源地生态环境保护提供科学依据,同时也为南水北调工程后期进一步扩大引汉规模,并预计在 2030 年完成年均调水量达 130 亿 m^3 的目标提供数据参考与决策支持。

5　结论

(1)在 2002—2017 年间,研究区稳定型轨迹面积占比最大,达到 61.80%,说明研究区总体土地利用状况稳定。

(2)随着城市化进程的加快和丹江口库区的建设,16 年间研究区土地利用变化总体趋势以耕地向建设用地转化和水域面积不断增加为主。由于丹江口库区建设和南水北调中线工程的实施,水域面积由 218.60 km^2 增长到 400.31 km^2。

(3)受地形影响,研究区北部山区和丘陵地带林地稳定性较好,而丘陵与平原的过渡地带林地和耕地、草地和耕地间的交替性变化频繁,占研究区总面积的 5.85%。随着南水北调中线工程的实施,研究流域内土地利用变化轨迹对于制定区域土地利用政策及水源地保护意义重大。

参　考　文　献

[1] 史培军,陈晋,潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. 地理学报,2000,55(2):151 – 160.
SHI Peijun, CHEN Jin, PAN Yaozhong. Landuse change mechanism in Shenzhen City[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2):151 – 160. (in Chinese)

[2] 徐小娇,周建峰,王文丽,等. 近十五年来江汉平原 LUCC 轨迹分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2012,34(1):110 – 115.
XU Xiaojiao, ZHOU Jianfeng, WANG Wenli, et al. The analysis of trajectories of the land use/cover change of Jianghan Plain from 1995 to 2010[J]. Journal of Hubei University(Natural Science),2012,34(1):110 – 115. (in Chinese)

[3] 黄方,张学敏. 白山市土地利用/覆被变化轨迹分析与趋势预测[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(3):439 – 451.
HUANG Fang, ZHANG Xuemin. Track analysis and trend forecast of land use/cover change in Baishan City[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2015,23(3):439 – 451. (in Chinese)

[4] 刘斌,白少云,余珮珩,等. 结合高分遥感和多源数据的高原湖泊流域土地利用分析[J]. 测绘通报,2019(12):77 – 82.
LIU Bin, BAI Shaoyun, YU Peiheng, et al. Land use analysis of plateau lake watershed based on GF and multi-source data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2019(12):77 – 82. (in Chinese)

[5] HU Guangyin, JIN Huijun, DONG Zhiba, et al. Research of land-use and land-cover change (LUCC) in the source regions of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(3):573 – 581.

[6] 王海涛,衣九妹. 辽宁省土地利用结构变化轨迹及驱动机制分析[J]. 东北大学学报(社会科学版),2014,16(3):256 – 262.
WANG Haitao, YI Jiumei. Analysis on the change track and driving mechanism of land use structure in Liaoning Province[J] Journal of Northeastern University(Social Science),2014,16(3):256 – 262. (in Chinese)

[7] 李云龙,韩美,孔祥伦,等. 近 30 年来黄河三角洲耕地轨迹转化及驱动力研究[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(9):136 – 143.
LI Yunlong, HAN Mei, KONG Xianglun, et al. Research on farmland track transformation and driving forces in the Yellow River Delta in recent 30 years[J]. China Population Resources and Environment,2019,29(9):136 – 143. (in Chinese)

[8] 黄勇,王凤友,蔡体久,等. 环渤海地区景观格局动态变化轨迹分析[J]. 水土保持学报,2015,29(2):314 – 319.
HUANG Yong, WANG Fengyou, CAI Tijiu, et al. Analysis of dynamic change track of landscape pattern in Bohai Rim Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(2):314 – 319. (in Chinese)

[9] 李晖,冯莉,聂芹,等. 基于稳定映射变化轨迹分析的厦门土地利用时空演化[J]. 生态学杂志,2016,35(8):2132 – 2143.
LI Hui, FENG Li, NIE Qin, et al. Spatio-temporal pattern analysis of land use change trajectories based on stability mapping in Xiamen[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(8):2132 – 2143. (in Chinese)

[10] 齐建超,刘慧平,高啸峰. 基于自组织映射法的时间序列土地利用变化的时空可视化[J]. 地球信息科学学报,2017,19(6):792 – 799.
QI Jianchao, LIU Huiping, GAO Xiaofeng. Research on the spatio-temporal visualization of multiple time series land use change by the self-organizing map[J]. Journal of Geo-Information Science,2017,19(6):792 – 799. (in Chinese)

[11] 张谱,管文轲,刘洪霞,等. 新疆迪那河流域轮台人工绿洲耕地时空变化特征分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):291 – 299.
ZHANG Pu, GUAN Wenke, LIU Hongxia, et al. Characteristics analysis on spatial-temporal changes of farmland in Luntai Artificial Oasis in Dina River Watershed of Xinjiang[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(5):291 – 299. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190533&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.033. (in Chinese)

[12] GARCIA-LVAREZ D, CAMACHO OLMEDO M T, PAEGELOW M. Sensitivity of a common land use cover change (LUCC) model to the minimum mapping unit (MMU) and minimum mapping width (MMW) of input maps [J]. Computers, Environment and Urban Systems,2019,78: 1 – 14.

[13] 陈元鹏,郧文聚,周旭,等. 基于 MESMA 和 RF 的山丘区土地利用信息分类提取[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):

136 – 144.
CHEN Yuanpeng, YUN Wenju, ZHOU Xu, et al. Classification and extraction of land use information in hilly area based on MESMA and RF classifier[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 136 – 144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170717&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.017. (in Chinese)
[14] YU Degui, WU Qun. Optimization and regulation policy for land use changes based on low-carbon emission in developed regions of China[J]. Asian Agricultural Research, 2017, 9(6): 67 – 76.
[15] 董亚东,杨文宇. 丹江口水库库区近 20 年的月水域变化分析[J]. 中国西部科技,2016,15(1):68 – 73.
DONG Yadong, YANG Wenyu. Analysis of monthly water area change in Danjiangkou Reservoir area in recent 20 years[J]. Science and Technology of West China, 2016, 15(1): 68 – 73. (in Chinese)
[16] 柳晶辉,杨坤,张力. 丹江口库区土地利用/覆被与景观格局变化[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(3):456 – 460.
LIU Jinghui, YANG Kun, ZHANG Li. On land use/cover change and landscape pattern in Danjiangkou Reservoir area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 456 – 460. (in Chinese)
[17] IMHOFF M L, ZHANG P, WOLFE R E, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3): 504 – 513.
[18] 郭斌,任志远. 陆地卫星影像用于土地利用覆被变化中的波段组合研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2007,35(2):112 – 116.
GUO Bin, REN Zhiyuan. Research in choose best band of Landsat images used in land use and land cover change[J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2007, 35(2): 112 – 116. (in Chinese)
[19] 吴晓东,杨小虎,杨康. TM 影像的遥感分类方法研究[C]//中国科协年会——大数据与城乡治理研讨会, 2015.
WU Xiaodong, YANG Xiaohu, YANG Kang. Research on remote sensing classification method of TM image[C]//The 17th Annual Meeting of China Association for Science and Technology, 2015. (in Chinese)
[20] 吴学伟,龚文峰,徐亚明,等. 3 个时期大庆市区龙凤湿地土地利用变化图谱研究[J]. 湿地科学,2016, 14(4):451 – 457.
WU Xuewei, GONG Wenfeng, XU Yaming, et al. Mapping land use change of Longfeng Wetlands in urban area of Daqing City during three periods[J]. Wetland Science, 2016, 14(4): 451 – 457. (in Chinese)
[21] PAUDEL B, ZHANG Yili, LI Shicheng, et al. Review of studies on land use and land cover change in Nepal[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(4): 643 – 660.
[22] 吴迪,张冬有. 1990—2015 年东北三省土地利用/覆被时空变化特征及其驱动力分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(8):268 – 274.
WU Di, ZHANG Dongyou. Analysis of the spatial-temporal change characteristics and driving forces of land use/cover in three northeastern provinces from 1990 to 2015[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(8): 268 – 274. (in Chinese)
[23] AMY J S D, JEAN-CLAUDE T, ROSS K M. Multi-temporal trajectories of landscape change explain forest biodiversity in urbanizing ecosystems[J]. Landscape Ecology, 2017, 32(9): 1789 – 1803.
[24] 杨国清,吴志峰,祝国瑞. 广州地区土地利用景观格局变化研究[J]. 农业工程学报, 2006,22(5):219 – 222.
YANG Guoqing, WU Zhifeng, ZHU Guorui. Analyzing and modeling land use pattern changes in rapid urbanization of area: a case study of Guangzhou City[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 219 – 222. (in Chinese)
[25] GHANI N L A, ABIDIN S Z Z. A modified landscape expansion index algorithm for urban growth classification using satellite remote sensing image[J]. Advanced Science Letters, 2018, 24(3): 1843 – 1846.
[26] 贾策. 丹江流域(河南段)土地利用变化及其生态环境响应研究[D]. 焦作:河南理工大学,2018.
JIA Ce. Study on land use change and its ecological environment response in Danjiang River Basin (Henan Section)[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2018. (in Chinese)
[27] 吴国玺,曹志刚,申怀飞. 河南省土地利用变化及分布格局[J]. 商业研究,2009(11):126 – 128.
WU Guoxi, CAO Zhigang, SHEN Huaifei. Study on land use change and the spatial pattern in Henan Province[J]. Commercial Research, 2009(11): 126 – 128. (in Chinese)
[28] 张永民,程维明,刘海江,等. 2005—2010 年河南省土地利用结构变化分析[J]. 水土保持研究,2015,22(2):258 – 263.
ZHANG Yongmin, CHENG Weiming, LIU Haijiang, et al. Analysis on changes in land use structure in Henan Province from 2005 to 2010[J]. Research of Soil and Water Concervation, 2015, 22(2): 258 – 263. (in Chinese)
[29] 董亚东,杨文宇,秦赫. 丹江口库区水域面积动态变化分析——基于长时间序列 Landsat 数据[J]. 安徽农业科学,2016,44(1):321 – 324.
DONG Yadong, YANG Wenyu, QIN He. Dynamic change analysis of water area in Danjiangkou Reservoir area based on long time series Landsat data[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(1): 321 – 324. (in Chinese)
[30] 常青,李双成,王仰麟,等. 基于稳定映射分析的深圳绿色景观时空演化及启示[J]. 地理学报,2012,67(12):1611 – 1622.
CHANG Qing, LI Shuangcheng, WANG Yanglin, et al. Green landscape evolution and its diving factors in Shenzhen[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(12): 1611 – 1622. (in Chinese)
[31] WANG Q Q, HU Y F, SONG W L, et al. Extraction of soil salinization from remote sensing information and LUCC data based on knowledge discovery over the arid area: a case study on Kuka County in Xinjiang[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90 – 93: 1706 – 1710.