

伊犁河中下游近40年土地利用与覆被变化

朱磊^{1,2}, 罗格平¹, 陈曦¹, 许文强¹, 冯异星^{1,2}, 郑青华^{1,2}, 王继燕^{1,2}, 周德成^{1,2}, 尹昌应^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 针对跨界流域土地利用/覆被变化(LUCC)信息十分有限, 无法满足对环境变化评估需要的现状, 本文以跨界流域——哈萨克斯坦境内伊犁河中下游为研究区, 利用20世纪70年代的MSS、90年代的TM、2000年和2007年的ETM卫星遥感影像, 采用目视解译与决策树相结合的分类方法, 可较高精度提取研究区LUCC的时空信息, 通过一套数理统计模型, 定量分析了区域LUCC的过程和趋势。近40年来, 高覆盖度林草地、中覆盖度林草地和耕地始终是伊犁河中下游地区所占比例最大的3种土地利用/覆被类型。整个研究时段内, 耕地、水库坑塘和未利用地先增加后减少, 其中耕地总体呈现减少的趋势, 但减少幅度逐渐减小, 水库坑塘和未利用地面积总体趋于增加。高覆盖度林草地和河流呈现出持续减少的态势, 而建设用地面积持续增加。中覆盖度林草地、湖泊和沼泽先增加后减少, 总体呈现增加趋势。低覆盖度林草地经历了减少—增加—减少的变化过程, 总体呈现减少趋势。耕地和林草地相互转换频繁, 其中耕地与高覆盖度林草地之间的转换和高、中覆盖度林草地之间的转换为区域内最主要的四种变化类型。1970—2007年间, 伊犁河中下游地区土地利用始终处于准平衡状态, 但有向不平衡状态发展的趋势。20世纪70年代卡普恰盖水库的建立和90年代初期的政策变化改变了原有变化的随机性和平稳性, 使区域内相关土地利用/覆被发生显著变化。

关 键 词: 伊犁河中下游; 土地利用/覆被变化; 遥感; 过程和趋势

1 引言

土地利用与土地覆盖从流域到全球的多种尺度上都发生了显著变化, 并由此不断改变着地球表面的生物、能量和水分等多种过程^[1-2], 是当今全球变化研究中的前沿和热点课题^[3-4]。对土地利用与土地覆盖变化(LUCC)的定量描述是这个科学问题首先需要解决的, 也是土地变化科学(land change science)的关键问题之一^[5]。遥感作为探测土地变化信息的主要数据源^[6-8], 已被广泛应用于多尺度LUCC信息提取及其利用变化的监测和可视化表达^[9-12], 在土地变化研究中正发挥着日益重要的作用^[13]。基于遥感信息源的土地利用/覆被信息自动提取方法目前被广泛应用, 主要包括最大似然分类法(Maximum Likelihood)、植被指数法(Normalized Difference Vegetation Index)法、神经网络法(Artificial Neural Network)、决策树法(Decision Tree)、支持向量机法(Support Vector Machines)等。这些分类方法不需要

有关数据分布的先验假设, 可以根据已知训练区提供的样本, 通过选择特征参数作为决策规则, 建立判别函数以对影像进行的图像分类, 具有融合多源地学数据的能力和较好的灵活性^[14-16]。然而, 训练样本的质量比分类器的选择对分类精度的影响更大, 在缺乏先验知识时训练样本质量受到影响, 使土地变化遥感自动分类结果精度受限^[8]。解决这一问题有效的办法之一是根据专家知识对自动分类结果进行人工目视判读校正^[17-18]。

中亚地区是典型的内陆干旱区, 属于生态环境脆弱区。20世纪70年代该地区进行了大规模的水土开发, 其对生态环境的负面延迟效应日益凸现, 湖泊河流水质恶化, 生物种类和数量急剧减少, 土地盐碱化、沙化日益严重, 沙尘暴和盐尘暴频发, 农牧业遭到严重损失^[19]。咸海严重萎缩后, 巴尔喀什湖成为中亚最大的内陆咸水湖^[20]。作为巴尔喀什湖最主要的给水河流, 伊犁河流域的土地利用/覆被变化对区域的生态环境具有重要意义^[21]。目前, 针对

收稿日期: 2009-07; 修订日期: 2009-12。

基金项目: 中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-307-03)。

作者简介: 朱磊(1982-), 男, 新疆库尔勒人, 博士生。主要从事土地利用/土地覆被变化、地理信息系统和遥感应用研究。

E-mail: smartzhulei04@163.com

通讯作者: 罗格平, 博士, 研究员, 博导, 主要从事土地利用/土地覆被变化、地理信息系统和遥感应用研究。

E-mail: luogp@ms.xjb.ac.cn

伊犁河上游地区LUCC的研究已有一定成果^[22-24],而对中下游地区的研究多在国家尺度上^[25],未将其作为单独的研究单元,对LUCC的描述不够深入和全面。也有研究对中下游地区内某一子区域的LUCC进行了描述^[26-27],但没有反映出区域的整体变化情况。现有的伊犁河地区尤其是中下游地区的土地利用/覆被变化信息十分有限,无法满足对中亚环境变化评估的需要。

本文以伊犁河中下游地区为研究区,利用4个时期的卫星遥感影像,将目视解译与决策树方法相结合,提取土地利用/覆被信息。在GIS和Matlab的支持下对近40年区域LUCC进行定量分析,揭示伊犁河中下游地区LUCC的过程与趋势,进一步完善干旱区典型区域的土地变化研究,并为该区域土地利用和生态环境保护提供一定的科学支撑。

2 研究区概况

伊犁河发源于天山西部哈萨克斯坦境内,流经中国新疆伊犁地区后注入哈萨克斯坦境内的巴尔喀什湖^[28]。伊犁河雅马渡站以上为上游,雅马渡至哈萨克斯坦的伊犁村为中游,伊犁村至巴尔喀什湖为下游。本文研究区所指“伊犁河中下游”为雅马渡站至巴尔喀什湖段的伊犁河流域。该区域位于哈萨克斯坦东南部(图1),北临萨雷耶西克阿特劳沙漠,总面积约11.9×10⁴ km²,地势东南高西北低。该地区属干旱区大陆性气候,季节性温差大,年最高、最低温度为45℃和-45℃,年均降水量135~150 mm^[20]。区域内几大山系均为元古代与古生代地层,岩石类型主要由坚硬的石英片岩、片麻岩、大理岩及华里西中晚期花岗岩等组成。天然剥蚀轻微,侵蚀模数不大,各河含沙量及年输沙量均较小,干支流多年平均含沙量一般在0.6 kg/m³左右。伊犁河下游分支较多,河流两岸生长有芦苇和多种乔灌木,且分布有大小不等的湖泊和沼泽地,其中还包括被沙漠覆盖的干旱与半干旱小岛屿,湖泊周围生长有茂密的毛苇和芦苇等植被^[29]。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源及处理

本研究采用的数据包括:1970年代MSS影像12景、1990年代LandSat TM影像14景、2000年代LandSat ETM影像14景和2007年

LandSat ETM影像14景以及相关水文气象数据。MSS影像采取421波段假彩色合成,TM和ETM影像采用432波段假彩色合成。用1:250 000地形图对2007年的ETM影像进行几何校正后作为参考图像,采用二次多项式转换方程对1970年、1990年和2000年的影像进行纠正,平均位置误差控制在1个象元以内,采用双线性内插法将图像重采样到60 m×60 m。由于研究区面积较大,较难获取同一年份、同一时相、覆盖整个区域的影像,故在研究区内选取同一时期内年份相隔1~5年以内且季相基本一致(6月~9月)的影像作为基础遥感数据,例如覆盖卡普恰盖水库的4期影像获取时间分别为1975-08-11、1991-10-29、1999-08-08和2007-08-22。为便于讨论,文中将四个时间段简称为1970、1990、2000和2007。

3.2 土地利用/覆被信息提取

土地利用与土地覆被类型的划分是进行LUCC过程和趋势研究的首要步骤,确定适宜的基本分类单元是关键。结合研究区内的实际情况,对照影像上的地物特征,本研究将土地利用类型划分为:耕地、林草地、水域、建设用地和未利用地。耕地C₁包括水田和旱地;林草地包括高覆盖度林草地C₂(覆盖度≥50%)、中覆盖度林草地C₃(20%≤覆盖度≤50%)和低覆盖度林草地C₄(5%≤覆盖度≤20%);水域包括河渠C₅、湖泊C₆、水库坑塘C₇和沼泽C₈;建设用地C₉包括居民建设用地和工矿交通用地;未利用地C₁₀指目前还未利用的土地,主要包括盐碱地、沙地、裸岩和未利用的闲置地等。其中,由于缺乏大比例尺地形图和土地利用图等其他参考,仅依靠遥感影像较难正确区分林地和草地、旱地和灌溉地。因此,本研究中将林地和草地合并为林草地,将旱地和水浇地合并为耕地,类型改变与合并没有改变分类的客观性。

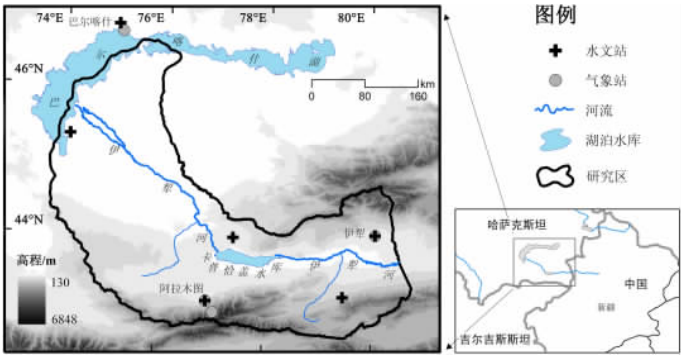


图1 研究区位置图

Fig.1 Geographical location of the study area

利用遥感图像处理软件 ENVI4.5,对 4 个时期的遥感影像进行主成分分析后采用结合纹理信息的决策树分类器对图像分别进行监督分类,经分类后处理滤掉一些噪声数据,从中提取出主要的土地利用类型,并结合人一机交互方式,参考与研究区自然条件相类似的已知区域建立对应判读标志,对错分的地区进行手工修改,得到伊犁河中下游地区 4 期土地利用覆被覆被空间分布图(图 2)。

3.3 精度验证

分类结果可信度的度量,一般是将航空照片、生态专题图、更高分辨率的影像和实地调查数据与分类结果进行比较^[30-31],进而通过混淆矩阵和 Kappa 分析进行定量描述。由于本研究无法对研究区进行实地勘察,故选用更高分辨率影像对分类结果进行精度检验。Google Earth(GE)作为一款虚拟地球仪软件把近 3~5 年的卫星影像、航空相片和 GIS 数据叠加在一个三维模型上,地表绝大部分的分辨率在 15 m 以上,个别地区配有实地拍摄照片,可以有效地对土地利用分类结果进行验证^[32]。研究中对于 2007 年的分类结果,根据土地利用/覆被类型所占比例在整个研究区内随机布设 500 个样本点,与 GE 中影像叠加,进行精度检验,得到 Kappa 系数为 0.842。对于 1970、1990 和 2000 年分类结果,则采用同样的方法对 1970~2007 年间土地利用未发生变化的区域进行验证^[33],得到 1970、1990 和 2000 年影像分类 Kappa 系数分别为 0.769、0.812 和 0.827,解译精度均满足土地利用变化监测的要求^[34]。

3.4 土地利用/覆被变化研究方法

运用 ArcGIS 对 4 期土地利用数据进行统计和叠加分析,得到各期之间的土地利用类型面积转移矩阵,在此基础上计算土地利用类型转移概率矩阵和贡献率矩阵,并采用土地利用/覆被变化状态与趋势模型分析伊犁河中下游地区土地利用的变化过程和趋势。模型中主要指数的数学表达式如下:

$$N_c = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times 100\% = \frac{\Delta U_{in} - \Delta U_{out}}{U_a} \times 100\% \quad (1)$$

$$T_c = \frac{\Delta U_{in} + \Delta U_{out}}{U_a} \times 100\% \quad (2)$$

$$P_s = \frac{N_c}{T_c} = \frac{\Delta U_{in} - \Delta U_{out}}{\Delta U_{in} + \Delta U_{out}} \quad \text{and} \quad -1 \leq P_s \leq 1, \quad \Delta U_{in} + \Delta U_{out} \neq 0 \quad (3)$$

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta U_{bi} - \Delta U_{ai}|}{2 \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta U_{in-i} - \Delta U_{out-i}|}{2 \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% \quad (4)$$

$$S_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta U_{out-i} + \Delta U_{in-i})}{2 \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{out-i}}{\sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{in-i}}{\sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% \quad (5)$$

$$P_t = \frac{S_a}{S_s} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta U_{out-i} - \Delta U_{in-i}|}{\sum_{i=1}^n (\Delta U_{out-i} + \Delta U_{in-i})}, \quad 0 \leq \frac{S_a}{S_s} \leq 1 \quad \text{and,} \quad 0 \leq P_t \leq 1 \quad S_s \neq 0 \quad (6)$$

式中: N_c 、 T_c 和 P_s 分别为单一 LUCC 类型的面积净变化指数、综合变化指数和趋势与状态指数; S_a 、 S_s 和 P_t 分别为总体 LUCC 的面积净变化指数、综合变化指数和趋势与状态指数; U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期某一土地类型的面积; ΔU_{out} 为研究时段内某一土地类型转变为其他类型的面积和; ΔU_{in} 为同时期其他类型转变为该类型的面积之和; U_{ai} 、 U_{bi} 分别为研究初期和末期第 i 种土地类型的面积; ΔU_{out-i} 为研究时段内第 i 种土地类型转变为其他类型的面积之和; ΔU_{in-i} 为其他类型转变为第 i 种类型的面积之和; n 为土地利用与土地覆被类型总数。模型中各参数的意义及其详细说明可参阅文献[35]。

4 结果

4.1 1970~2007 年伊犁河中下游地区土地利用/覆被变化过程

1970~1990 年,伊犁河中下游地区土地利用/覆被变化显著(图 2、图 3)。该时段面积增加最大的是耕地和未利用地,分别增加 $6.51 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $6.13 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。耕地、水库坑塘、建设用地和未利用地呈现增加趋势,其中未利用地增加最为显著增幅为 25.76%,耕地、水库坑塘和建设用地分别为 5.17%、3.64%和 14.10%。林草地减少幅度在 2.60%以下,河流、湖泊和沼泽减少幅度分别为 4.62%、7.87%和

8.72%。高覆盖度林草地面积变化不大,仅减少了 $0.187\times10^4\text{ hm}^2$ 。

1990–2000年,面积变化最大的是耕地和低覆盖度林草地,其中耕地减少 $10.6\times10^4\text{ hm}^2$,低覆盖度林草地增加 $11.2\times10^4\text{ hm}^2$ 。耕地变化趋势由增加转为减少,中、低覆盖度林草地由减少转为增加,其中低覆盖度林草地增幅为31.86%,为各类型中最高。水库坑塘、建设用地和未利用地持续增加,其中水库坑塘增幅较上一时段有所增加,未利用地增幅有所缩小,建设用地基本保持不变。高覆盖度林草地、河流、湖泊和沼泽持续减少,除高覆盖度林草地之外减幅均有所缩小。

2000–2007年,面积变化最大的是低覆盖度林草地和中覆盖度林草地,分别减少 $12.1\times10^4\text{ hm}^2$ 和增加 $6.86\times10^4\text{ hm}^2$ 。中覆盖度林草地和建设用地较上一时段继续增加,高覆盖度林草地和河流较上一时段继续减少。低覆盖度林草地、水库坑塘和未利用地变化趋势由增加转为减少,耕地、湖泊和沼泽由减少转为增加。低覆盖度林草地为各类减幅中最大,为26.05%,湖泊为各类增幅最大,为15.97%。

近40年来,耕地经历了“增加—减少—增加”的变化过程,其中2000–2007年间耕地已开始缓慢增加,但2007年耕地规模还未超过规模最高的20世纪90年代。水库坑塘和未利用地先增加后减少,面积总体趋于增加。高覆盖度林草地和河流呈现出持续减少的态势,而建设用地面积持续增加。中覆盖度林草地、湖泊和沼泽先减少后增加,面积总体趋于增加。低覆盖度林草地经历了“减少—增加—减少”的变化过程,面积总体呈现减少趋势。高覆盖度林草地、中覆盖度林草地和耕地始终是研究区内所占比例最大的3种土地利用/覆被类型,累计所占比例为84%左右。

从1970年各土地利用/覆被类型的转化方向来看(表1),耕地主要转向了高覆盖度林草地和中覆盖度林草地,转换面积分别为 $18.9\times10^4\text{ hm}^2$ 和 $4.65\times10^4\text{ hm}^2$ 。高覆盖度林草地主要转变为中覆盖度林草地和耕地,转换面积分别为 $16.4\times10^4\text{ hm}^2$ 和 $16.2\times10^4\text{ hm}^2$ 。中覆盖度林草地主要转变为高覆盖度林草地和低覆盖度林草地,转换面积分别为 $12.0\times10^4\text{ hm}^2$ 和 $8.53\times10^4\text{ hm}^2$ 。整个研究时段内,耕地和林、草地相互转换频繁,其中耕地与高覆盖度林草地之间的转换和高、中覆盖度林草地之间的转换为区域内最主要的四种变化类型。说明近40年

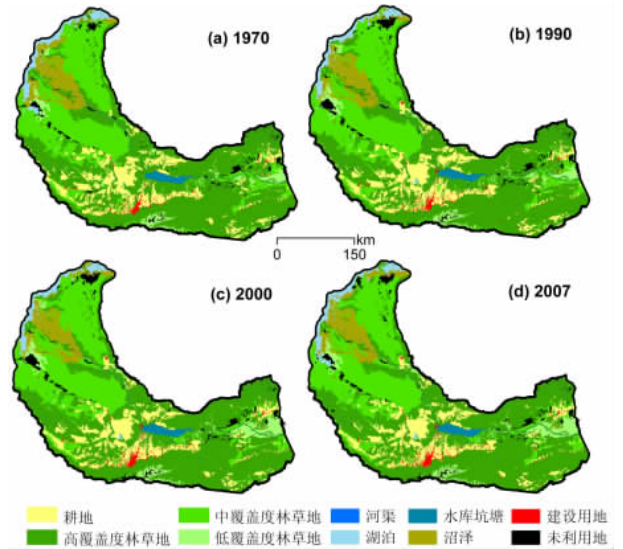


图2 1970–2007年伊犁河中下游地区土地利用/覆被空间分布图

Fig. 2 Land use/ land cover pattern in the middle and lower reaches of the Ili River during 1970–2007

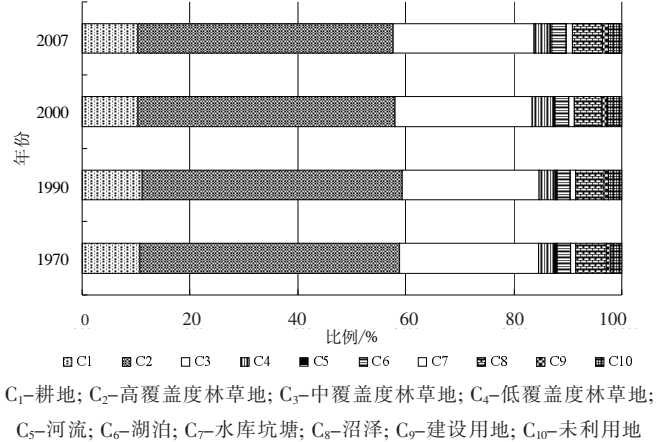


图3 伊犁河中下游地区1970–2007年土地利用/覆被结构

Fig.3 Land use/land cover structure of the middle and lower reaches of the Ili River from 1970 to 2007

来研究区内耕地的撂荒和开垦频繁发生,且转换面积较大。河流所占比例不大,但却以18.90%的比例向高覆盖度林草地和沼泽转换。湖泊主要转变为沼泽和林、草地,其中因湖泊干涸后产生的次生沼泽面积为 $1.80\times10^4\text{ hm}^2$ 。水库坑塘主要转向高覆盖度林草地,转换面积为 $0.248\times10^4\text{ hm}^2$ 。沼泽主要转换为林草地和湖泊,转换面积为 $5.58\times10^4\text{ hm}^2$,也有469 hm^2 的沼泽转换为耕地。建设用地转换为其他土地利用/覆被类型的比例很小,分别只有3.95%和1.19%的建设用地转变为耕地和高、中覆盖度林草地。未利用地主要转变为林草地,转换比例为14.29%,还有不到3%的未利用地转换为耕地、湖泊和沼泽。

表 1 1970–2007 年伊犁河中下游地区土地利用转移概率矩阵(单位: %)

Tab.1 Transition probability matrix of land use/land cover in the middle and lower Ili River from 1970 to 2007 (%)

2007 1970		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
C ₁	A	79.43	14.99	3.69	0.57	0.01	0.23	0.02	0.00	0.90	0.17
	B	82.42	3.35	1.50	2.08	0.23	0.87	0.21	0.00	9.23	0.72
C ₂	A	2.83	91.89	2.87	0.86	0.06	0.10	0.23	0.59	0.38	0.19
	B	13.31	93.26	5.29	14.32	7.50	1.68	10.39	5.05	17.80	3.75
C ₃	A	0.97	3.94	89.49	2.79	0.00	0.06	0.00	0.88	0.12	1.75
	B	2.45	2.14	88.45	24.83	0.28	0.51	0.00	3.99	3.06	18.34
C ₄	A	3.59	4.27	30.02	53.31	0.02	0.82	0.00	0.98	0.08	6.90
	B	1.07	0.27	3.51	56.09	0.16	0.90	0.00	0.53	0.24	8.54
C ₅	A	0.02	10.31	1.44	0.05	81.41	0.09	0.12	6.56	0.00	0.00
	B	0.00	0.08	0.02	0.01	87.49	0.01	0.04	0.44	0.00	0.00
C ₆	A	0.21	1.02	0.04	0.00	0.08	92.18	0.15	5.75	0.02	0.55
	B	0.05	0.06	0.00	0.00	0.59	87.77	0.36	2.69	0.05	0.59
C ₇	A	0.71	2.12	0.00	0.25	0.00	0.08	96.76	0.03	0.04	0.00
	B	0.07	0.04	0.00	0.08	0.00	0.03	88.75	0.01	0.04	0.00
C ₈	A	0.07	4.51	3.29	0.54	0.23	3.86	0.04	87.27	0.00	0.21
	B	0.04	0.54	0.71	1.05	3.59	7.84	0.18	87.10	0.00	0.48
C ₉	A	3.95	0.58	0.61	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	94.78	0.00
	B	0.29	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	69.29	0.00
C ₁₀	A	1.52	5.68	6.39	2.22	0.03	0.55	0.00	0.55	0.15	82.90
	B	0.30	0.24	0.49	1.54	0.16	0.39	0.00	0.20	0.28	67.56

注:表中行表示研究时段初期的*i*种土地利用类型;列表示研究时段末期的*j*种土地利用类型;*A*表示初期*i*种土地利用类型转变为末期*j*种土地利用类型的比例;*B*表示末期*j*种土地利用类型由初期*i*种土地利用类型转化而来的比例;*C*₁–耕地,*C*₂–高覆盖度林草地,*C*₃–中覆盖度林草地,*C*₄–低覆盖度林草地,*C*₅–河流,*C*₆–湖泊,*C*₇–水库坑塘,*C*₈–沼泽,*C*₉–建设用地,*C*₁₀–未利用地。

从 2007 年各土地利用/覆被类型的转化源看,耕地主要由林草地转换而来,转换面积为 20.4×10⁴ hm²。高覆盖度林草地主要由耕地和中覆盖度林草地转换而来,转换面积分别为 18.9×10⁴ hm² 和 12.0×10⁴ hm²。新增中覆盖度林草地主要来自高、低覆盖度林草地和耕地。低覆盖度林草地主要由高、中覆盖度林草地转换而来,转换比例较高,分别为 14.32%和 24.83%。河流主要由高覆盖度林草地和沼泽转换而来,转换面积为 0.316×10⁴ hm² 和 0.151×10⁴ hm²。湖泊主要由沼泽和林草地转换而来,转换面积分别为 2.58×10⁴ hm² 和 1.02×10⁴ hm²。水库坑塘主要由高覆盖度林草地转换而来,转换比例为 10.39%,远高于其他土地利用/覆被转换类型。沼泽主要由林草地转换而来,转换比例为 9.57%,另有 1.80×10⁴ hm² 的沼泽来自于转换的湖泊。建设用地主要由高覆盖度林草地、耕地和中覆盖度林草地转换而来,转换面积分别为 2.19×10⁴ hm²、1.14×10⁴ hm 和 0.377×10⁴ hm²。未利用地主要由林草地转换而来,转换比例高达 30.64%,其余少量来自转换的耕地、湖泊和沼泽。

4.2 伊犁河下游地区 LUCC 的状态与趋势分析

根据土地利用/覆被变化状态与趋势模型,得到伊犁河中下游地区的 LUCC 的过程和趋势指数(表 2、表 3)。近 40 年来该区域内各土地利用/覆被

类型经历着“涨势”和“落势”的波动。耕地在 1970–1990 年间处于“涨势”,在 1990–2007 年之间一直呈现“落势”,自 1991 年哈萨克斯坦独立以来,耕地面积显著减少,但减少规模变缓,逐步接近均衡态势。高覆盖度林草地在各时段内均处于缓慢减少的状态,基本处于双向转换均衡态势。中覆盖度林草地在 1970–1990 年间处于“落势”,1990–2007 年间一直呈现“涨势”。低覆盖度林草地呈现先“落势”后“涨势”再“落势”的波动,其中 1990–2000 年土地类型的转换方向主要为其他类型转换为地覆盖度林草地,呈现极端非平衡态势,致使该类面积稳步增加。河流在整个时段内一直呈现“落势”,但向其他 LUCC 类型转换的规模变缓,呈现双向转换均衡态势。湖泊在 1970–2000 年间一直处于“落势”,2000–2007 年间转为“涨势”。水库坑塘在 1970–2000 年间“涨势”明显,其中 1970–1990 年间处于极端非平衡态势,面积稳步增加。2000–2007 年间,水库坑塘又呈现极端不平衡的“落势”,变化方向和态势受人为因素影响显著。沼泽在 1970–1990 年间呈现“落势”,1990–2000 年间沼泽转为其他 LUCC 类型的规模变缓,双向转换频繁,呈现平衡态势,2000–2007 年间呈现较显著的“涨势”,面积明显增加。建设用地在整个时段内一直呈现“涨势”,在 1990–2000 年间涨势最高,随后变缓。

表 2 伊犁河中下游单一土地利用/覆被类型变化指数

Tab.2 Individual status and trend indices in the middle and lower reaches of the Ili River

土地利用/ 覆被类型	1970-1990			1990-2000			2000-2007			1970-2007		
	<i>N_c</i> /%	<i>T_c</i> /%	<i>P_s</i>	<i>N_c</i> /%	<i>T_c</i> /%	<i>P_s</i>	<i>N_c</i> /%	<i>T_c</i> /%	<i>P_s</i>	<i>N_c</i> /%	<i>T_c</i> /%	<i>P_s</i>
C ₁	5.17	24.67	0.21	-8.00	21.67	-0.37	-0.39	12.13	-0.03	-3.63	37.52	-0.10
C ₂	-0.03	7.89	0.00	-0.92	10.18	-0.09	-0.52	4.03	-0.13	-1.47	14.75	-0.10
C ₃	-1.54	7.46	-0.21	0.48	13.95	0.03	2.27	9.18	0.25	1.18	22.19	0.05
C ₄	-1.31	28.74	-0.05	32.59	36.14	0.90	-25.32	36.01	-0.70	-4.95	89.89	-0.04
C ₅	-4.61	13.86	-0.33	-1.80	17.90	-0.10	-0.66	8.26	-0.08	-6.79	30.23	-0.23
C ₆	-7.87	14.97	-0.53	-1.70	4.02	-0.42	15.97	17.76	0.90	5.03	20.67	0.24
C ₇	3.64	4.03	0.90	9.38	12.18	0.77	-3.82	4.12	-0.93	9.03	15.50	0.58
C ₈	-8.72	17.67	-0.49	-0.65	12.76	-0.05	10.49	14.90	0.70	0.19	25.66	0.01
C ₉	14.04	19.86	0.71	15.04	19.03	0.79	4.27	12.17	0.35	36.89	47.22	0.78
C ₁₀	25.76	50.44	0.51	4.86	13.90	0.35	-6.95	28.24	-0.25	22.71	56.90	0.40

注:*N_c*、*T_c*、*P_s* 分别为单一 LUCC 类型的面积净变化、LUCC 类型的总变化和单一土地利用/覆被类型的变化趋势和状态指数。C₁—耕地,C₂—高覆盖度林草地,C₃—中覆盖度林草地,C₄—低覆盖度林草地,C₅—河流,C₆—湖泊,C₇—水库坑塘,C₈—沼泽,C₉—建设用地,C₁₀—未利用地。

未利用地在 1970–2000 年间一直呈现“涨势”,但其他 LUCC 类型转变为未利用地的规模变缓,2000–2007 年转为“落势”,面积有所减少。

整个时段内的综合状态与趋势指数 (*P_t*)为 0.25,区域土地利用/覆被总体处于平衡状态。但 *P_t* 值从初期的 0.38 增至末期的 0.48,虽仍属准平衡状态,但已呈现向不平衡状态发展的趋势。面积净变化指数(*S_a*)先增加后减小,综合变化指数(*S_s*)一直处于减小的趋势。

5 讨论

40 年来,在经历了国家制度改革和大规模水土开发后,伊犁河中下游地区土地利用/覆被发生了显著的变化。耕地受政策影响显著,耕地面积在 20 世纪 90 年代前后达到最大值,之后面积下降,随后在 21 世纪初又有所增加,但 2007 年耕地规模还未超过规模最高的 20 世纪 90 年代。这主要是由于哈萨克斯坦是农业较发达的内陆国家,自然气候条件较好,耕地面积辽阔。在苏联时期,哈国农业基本实现了规模化、机械化经营,为种植业和养殖业的发展奠定了较为坚实的基础。1991 年 12 月 20 日苏联解体,哈萨克斯坦共和国独立并加入独联体,推行以私有化为先导的农村改革,农民个人取得了土地的使用权和其他生产资料的所有权,原有的生产关系发生了很大变化。私营的农(牧)场主和农户取代原来的国营农场和集体农庄,成为农业生产的主要力量。伴随改革而来的是外国农牧产品进入国内市场,农村社会环境恶化,农业技术设备老化,耕作粗放,投入减少,导致个别国营和私人农场无人经

表 3 伊犁河中下游土地利用/覆被综合状态与趋势指数

Tab.3 Total status and trend index in the middle and lower reaches of the Ili River

	1970-1990	1990-2000	2000-2007	1970-2007
<i>S_a</i> /%	36.38	37.75	35.34	45.32
<i>S_s</i> /%	94.85	80.92	73.43	180.40
<i>P_t</i>	0.38	0.47	0.48	0.25

注:*S_a*、*S_s*、*P_t* 分别为综合 LUCC 类型的面积净变化、LUCC 类型的综合变化和综合土地利用/覆被类型的变化趋势和状态指数。

营而撂荒,农用地面积和农产品数量显著下降^[25]。1990–2000 年,哈国农业经济发展呈波浪式下滑态势。90 年代末期,随着哈国国内政治的稳定和经济的发展,农业规模又逐渐扩大,部分在撂荒地上发育而来的高覆盖度林草地又被重新开垦为耕地。这可能也是导致的耕地和高覆盖度林草地之间频繁转换的主要原因。

沼泽等土地利用/覆被类型受人类活动影响较小,主要分布在伊犁河河道两岸和三角洲地区,其变化主要由气候条件和河流来水量等自然因素驱动。研究区 20 世纪的年降水总量呈波浪式增长趋势,90 年代前期略有减少,随后逐渐上升;年均气温总体呈上升趋势,正向一个较暖时期过渡,并大致有 10~23 年的周期性^[35]。同时,根据研究区内及周边的 4 个气象站和 6 个水文站(图 1)的观测数据,该区域近 40 年处在一个总体“暖湿”的时期。沼泽面积在 70 年代开始逐年减少,90 年代末达到最小值,随后一直保持增长,对气温和降水的年际变化有较好的响应。此外,卡普恰盖水库蓄水后,拦蓄了所有的伊犁河春季洪水期水量,使得河流下游河滩地上的大片植被枯萎,这可能也是导致 20 世纪 70 年代至 90 年代间沼泽面积减少的一个重要因素。

巴尔喀什湖的面积与其水位密切相关,在经历了 20 世纪后期人类活动剧烈影响的现代气候条件下,巴尔喀什湖水位的涨落变化更加频繁^[35],湖水位的变化主要取决于伊犁河入湖水量的变化^[36]。由于卡普恰盖水库水面面积巨大,每年蒸发损失 $10.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 水量,导致流入下游河滩三角洲的水量减少^[37],如:流向三角洲上游乌什札尔马牧场的年均水流量从 1940–1969 年间的 $470 \text{ m}^3/\text{s}$ 减少到 1970–1983 年间的 $360 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[37]。此外,阿拉木图干渠、阿克达拉运河的修建以及大型灌区的发展等,使巴尔喀什湖于 1987 年达到了自 60 年代以来的最低水位,之后一直呈升高趋势。这与巴尔喀什湖面积在 1970–1990 年间一直处于减小状态,2000–2007 年间增长明显的变化过程较吻合。

1970–1990 年的综合变化指数(S_s)为各阶段最高,说明该时段内各类型之间的空间双向转移过程(交换过程)较频繁。1990–2000 年间土地利用/覆被类型面积净变化指数(S_a)高于其他两个时间段,综合变化指数却不是各阶段最高,说明该时段内的空间双向转移过程有所减少,单向转移过程增加,但交换面积有所增加。2000–2007 年又转为减小,继续下降,表明区域内土地利用/覆被类型的双向转换的频率持续减小,而交换面积有所下降。

整个时段内的总体土地利用/覆被变化应是各时段土地利用/覆被变化的累加,但该变化值小于各时段变化值之和。这可能是以下原因所致,即某一土地利用/覆被类型在 t 时段内转换为其他类型, $t+1$ 时段又转回初始的状态。这类变化只能在其所在的 t 或 $t+1$ 时段中反映出来,不能对整个时段产生影响^[38]。

6 结论

(1) 目视解译与决策树法相结合的方法对伊犁河中下游地区的遥感影像分类效果较好,Kappa 系数均接近或高于 0.8,能够满足土地利用变化分析需要。而且在缺少大比例尺参考图件和无法进行实地验证的情况下,运用 Google Earth Pro[®] 提供的高分辨率影像和图片对 MSS、TM 和 ETM 图像分类结果进行精度检验是一个有效的手段。

(2) 近 40 年来,研究区耕地经历了增加—减少—增加的变化过程,其中 2000–2007 年间耕地已开始缓慢增加,但 2007 年耕地规模还未超过规模

最高的 1990 年代。水库坑塘和未利用地先增加后减少,面积总体趋于增加。高覆盖度林草地和河流呈现出持续减少的态势,而建设用地面积持续增加。中覆盖度林草地、湖泊和沼泽先减少后增加,总体呈现增加趋势。低覆盖度林草地经历了“减少—增加—减少”的变化过程,总体呈现减少趋势。高覆盖度林草地、中覆盖度林草地和耕地始终是研究区内所占比例最大的 3 种土地利用/覆被类型。整个研究时段内,耕地和林草地相互转换频繁,其中耕地与高覆盖度林草地之间的转换和高、中覆盖度林草地之间的转换为区域内最主要的四种变化类型。

(3) 1970–2007 年间,伊犁河中下游地区的土地利用状态与趋势指数(P_t)为 0.25,处于平衡状态。三个时段内的 P_t 分别为 0.38、0.47 和 0.48,虽均属于准平衡状态,但已有向不平衡状态发展的趋势。20 世纪 90 年代中初期的政策变化改变了原有 LUCC 的随机性和平稳性,使区域内相关土地利用/覆被类型的变化特征发生显著变化。

(4) 耕地变化受政策影响显著,政治体制改革使得部分在 20 世纪 90 年代被撂荒的耕地,21 世纪初又被重新开垦,这可能是导致的耕地和高覆盖度林草地之间频繁转换的主要原因。沼泽变化主要由气候条件和伊犁河来水量等因素驱动。

参考文献

- [1] Lambin E F, Baulies X, Bockstael N E, et al. Land-use and land-cover change implementation strategy. Stockholm: IGBP Report No.48 and IHDP Report No.10, 2002, 21–66.
- [2] Wolter P T, Johnston C A, Niemi G J. Land use land cover change in the U.S. Great Lakes Basin 1992 to 2001. Journal of Great Lakes Research, 2006, 32(3): 607–628.
- [3] 陈佑启, 杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展. 经济地理, 2001, 21(1): 95–100.
- [4] 唐华俊, 陈佑启, 邱建军, 等. 中国土地利用/土地覆盖变化研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [5] Turner B L II, Matson P A, McCarthy J J, et al. Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: Three case studies. Proceedings of the National Academies of Sciences, 2003, 100(14): 8080–8085.
- [6] Foody G M. Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 185–201.
- [7] Fassnacht K S, Cohen W B, Spies T A. Key issues in making and using satellite-based maps in ecology: A primer. Forest Ecology and Management, 2006, 222(1–3):

- 167–181.
- [8] Kavzoglu T. Increasing the accuracy of neural network classification using refined training data. *Environmental Modeling & Software*, 2009, 24(7): 850–858.
- [9] Roy P S, Tomar S. Biodiversity characterization at landscape level using geospatial modeling technique. *Biological Conservation*, 2000, 95(1): 95–109.
- [10] Amarnath G, Murthy M S R, Britto S J, et al. Diagnostic analysis of conservation zones using remote sensing and GIS techniques in wet evergreen forests of the Western Ghats: An ecological hotspot, Tamil Nadu, India. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12: 2331–2359.
- [11] Kerr J T, Ostrovsky M. From space to species: Ecological applications for remote sensing. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 2003, 18(6): 299–305.
- [12] Rouget M. Measuring conservation value at fine and broad scales: implications for a diverse and fragmented region, the Agulhas Plain. *Biological Conservation*, 2003, 112 (1–2): 217–232.
- [13] 胡召玲, 杜培军, 赵昕. 徐州煤矿区土地利用变化分析. *地理学报*, 2007, 62(11): 1204–214.
- [14] Hansen M, Dubayah R, Defries R. Classification trees, an alternative to traditional land cover classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(5): 1075–1081.
- [15] Friedl M A, Brodley C E. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. *Remote Sensing Environment*, 1997, 61(3): 399–409.
- [16] Rogan J, Franklin J, Roberts D A. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 143–156.
- [17] 秦其明. 遥感图像自动解译面临的问题与解决的途径. *测绘科学*, 2000, 25(2): 21–24.
- [18] Cunningham M A. Accuracy assessment of digitized and classified land cover data for wildlife habitat. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78(3): 217–228.
- [19] 吉力力·阿不都外力, 木巴热克·阿尤普. 基于生态足迹的中亚区域生态安全评价. *地理研究*, 2008, 27(6): 1309–1320.
- [20] Plisak R P. *Izmeneniya Rastitel'nosti Delti Reki Ili pri Zaregulirovanii Stoka*. Nauka, Alma-Ata, 1981: 216. (in Russian)
- [21] Anon. *Prirodnie Resursy Bolshikh Ozer SSSR i Veroyatnie ikh Izmeneniya*. Natural Resources of Large Lakes in the USSR and their Probable Changes. Leningrad, Nauka, 1984: 228. (in Russian)
- [22] 王秀红, 杨阳, 张红旗. 新疆伊犁地区土地利用变化特点分析. *新疆农业科学*, 2008, 45(S3): 13–16.
- [23] 包桂荣, 白长寿, 高清竹, 等. 新疆伊犁河流域土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响. *中国农业气象*, 2008, 29(2): 208–212.
- [24] 加尔肯, 王文杰, 朱海涌, 等. 伊犁河谷土地利用/土地覆被遥感调查分析研究. *新疆环境保护*, 2007, 29 (3): 05–10.
- [25] Gitelson A, Beurs K M, et al. Consequences of institutional change: Land–cover dynamics in Kazakhstan 1960–2000. 2001–2002 Progress Report for NASA LCLUC project 1–6. <http://www.calmit.unl.edu/kz/>, 2002.
- [26] Beurs K M de, Henebry G M. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 497–509.
- [27] Sivanpillai R, Latchininsky A V, Driese K L, et al. Mapping locust habitats in River Ili Delta, Kazakhstan, using Landsat imagery. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 117(2/3): 128–134.
- [28] 叶佰生, 赖祖铭, 施雅风. 气候变化对天山伊犁河上游河川径流的影响. *冰川冻土*, 1996, 18(1): 29–36.
- [29] 扎特卡柏耶夫. 伊犁河下游鹈鹕鸟种群现状. *干旱区研究*, 1990, 7(4): 71–72.
- [30] Uzun G, Yucel M, Yilmaz K T, et al.. Biotope mapping in the example of Cukurova Deltas. Turkish Scientific and Technical Research Centre, Nr. TUBITAK TBAG.1164, final report, Adana, Turkey, 1995: 144.
- [31] Altan O. Use of photogrammetry, remote sensing and spatial information technologies in disaster management, especially earthquakes. *Geo-information for Disaster Management*, 2005, 4: 311–322.
- [32] Luedeling E, Buerkert A. Typology of oases in northern Oman based on Landsat and SRTM imagery and geological survey data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 (3): 1181–1195.
- [33] 黄雄伟. 基于 GIS 和 RS 的城市土地利用时空演化研究: 以长沙为例. 中国地质大学, 2008.
- [34] Janssen L L F, Vander Welf F J M. Accuracy assessment of satellite derived land–cover data: A review. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1994, 60(4): 419–426.
- [35] 郭利丹, 夏自强, 李捷, 等. 巴尔喀什湖流域气候变化特征分析. *河海大学学报: 自然科学版*, 2008, 36 (3): 316–321.
- [36] 杨川德. 巴尔喀什湖水位变化及其原因. *干旱区地理*, 1993, 16(1): 36–42.
- [37] 张忠. 哈萨克斯坦伊犁河: 巴尔喀什湖水域现状. *中亚信息*, 2001(5): 22.
- [38] Luo G P, Zhou C H, Chen X, et al. A methodology of characterizing status and trend of land changes in oases: A case study of Sangong River watershed, Xinjiang, China. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4): 775–783.

Detection of Land Use/Land Cover Change in the Middle and Lower Reaches of the Ili River, 1970–2007

ZHU Lei^{1,2}, LUO Geping¹, CHEN Xi¹, XU Wenqiang¹, FENG Yixing^{1,2},
ZHENG Qinghua^{1,2}, WANG Jiyan^{1,2}, ZHOU Decheng^{1,2}, YIN Changying^{1,2}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Land use/land cover change (LUCC) information is usually limited in the transboundary river basin. It is unable to meet the needs for environmental assessment. Central Asia is the most fragile ecological area in the world. As the largest import river supply to Balkhash Lake, Ili River plays a significant role on regional environment. In this study we took a case of the middle and lower reaches of the Ili River, which is bordered with Xinjiang, China, to analyse the process and trend of LUCC at a regional scale quantitatively. Based on MSS images in the 1970s, TM images in the 1990s, and ETM images in the 2000s and 2007, spatial data about land use/land cover were obtained in this study with the combination of visual interpretation and the decision tree classification module. Because of the lack of the large scale reference data (e.g. aerial photographs or topographic maps) and field survey, we assessed the classification accuracy with higher resolution images on Google Earth Pro[®]. Then the characteristics of LUCC were quantified by the way of process and trend models. The results showed that densely covered woodlands and grasslands, moderately covered woodlands and grasslands and cultivated lands always accounted for the largest areal proportion in the middle and lower reaches of the Ili River in the past four decades. The area of moderately covered woodlands and grasslands, lakes, reservoirs, swamps, construction lands and unused lands increased considerably, with only a slight increase of swamps. The area of cultivated lands, densely covered woodlands and grasslands, sparsely covered woodlands and grasslands and river decreased slightly. The major LUCC categories were the swamps between cultivated lands and densely covered woodlands and grasslands as well as the swamps between densely covered woodlands and grasslands and moderately covered woodlands and grasslands. The area of cultivated lands was influenced significantly by policies. Although the land use/land cover still at the quasi-balanced status in the entire period, a trend of imbalanced status was appeared. Natural and anthropogenic driving forces effected LUCC of the middle and lower reaches of the Ili River as a whole. The construction of Kapchagay Reservoir in the 1970s and the institutional reform in the early 1990s changed the randomness and stability of LUCC, and made the regional land use/land cover change more obvious.

Key words: the middle and lower reaches of the Ili River; land use/land cover change; remote sensing; process and trend

本文引用格式：
朱磊, 罗格平, 陈曦, 等. 伊犁河中下游近 40 年土地利用与覆被变化. 地理科学进展, 2010, 29(3): 292–300.