

精河县土地利用/覆被变化及土地生态安全研究

于海洋^{1,2}, 张飞^{1,2,3}, 曹雷^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆智慧城市与环境建模普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:基于3S技术对土地利用/覆被和土地生态安全的研究,不仅可以为经济发展提供依据,同时也能为生态环境保护提供一定的借鉴。以精河县为研究区,选择2005年、2011年和2014年3期Landsat遥感影像数据,利用RS和GIS技术对精河县的土地利用/覆被进行了定量的提取,结合近10年社会经济数据,构建精河县“驱动力—压力—状态—影响—响应”(Driving force-Pressure-State-Impact-Response, D-P-S-I-R)评价指标体系,对精河县土地利用/覆被与土地生态安全变化进行分析。结果表明:(1)2005—2014年,精河县土地生态安全状况先恶化后改善,总体向好的方面转变,但其分布格局极不平衡;(2)水体、耕地和林草地是精河县土地生态安全指数较高的地类;(3)精河县大部分地区处于临界安全水平,精河县土地生态安全状况亟待改善。

关键词:土地生态安全; 土地利用/覆被; DPSIR; 精河县

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0348-06

Research of Land Use/Cover Change and Land Ecological Security in Jinghe County

YU Haiyang^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2,3}, CAO Lei^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Key Laboratory of Xinjiang Wisdom City and Environment Modeling, Urumqi 830046, China)

Abstract:Based on 3S technology, research for industry structure and land use/over can not only provide the basis for economic development, but also provide a reference for the ecological and environmental protection. The Jinghe County was selected as an example for the study, and the Landsat images of 2005, 2011 and 2014 were selected as remote sensing data. RS and GIS technology were used to extract land use/cover data of Jinghe County, and near 10 a social-economical data were combined to construct the Driving force-Pressure-State-Impact-Response (D-P-S-I-R) land ecological security evaluation model in Jinghe. Entropy weight method was used to determine the index weights. Then, the land use/cover and land ecological security changes in Jinghe County were analyzed. The results show that: (1) between 2005 and 2014, the deteriorated land ecological security situation had been improved in Jinghe County, the land ecological security distribution pattern was not unequal; (2) the high value of land ecological security index was water body, farmland, and grassland; (3) many areas in Jinghe County are at the critical security level. The land ecological security of Jinghe County needs to be improved urgently.

Keywords:land ecological security; land use/cover; DPSIR; Jinghe County

目前,受陆地生态系统自然协调失衡、土地资源过度开发和利用的影响下,土地生态系统愈发脆弱,

土地生态功能大幅退化,甚至一些地方的土地生态系统已出现明显缺陷。为定量描述区域生态系统的健

收稿日期:2016-08-24

修回日期:2016-11-10

资助项目:自治区青年科技创新人才培养工程项目(2013731002);国家自然科学基金(41361045,41130531);新疆绿洲生态(教育部部共建)重点实验室开放课题项目(XJDX0201-2012-01)

第一作者:于海洋(1992—),男,河南周口人,硕士研究生,干旱区生态环境遥感应用研究。E-mail:yuhaiyang6668@163.com

通信作者:张飞(1980—),男,陕西凤阳人,副教授,博士,干旱区生态环境遥感应用研究。E-mail:zhangfei3S@163.com

康和完整状况,IIASA(International Institute for Application System Analysis)在1989年提出生态安全相关概念^[1],即从多角度出发,思考和探讨生态系统的安全问题,而土地生态安全评价是进行区域土地生态系统研究的重要组成部分。土地生态安全评价方法众多,国外研究主要集中在基因工程生物的生态风险与安全、生态入侵风险、食品安全、水资源安全、生态系统健康等方面^[2-4],而国内相关研究则集中在区域生态系统安全的研究方法、指标体系、安全阈值的确定等方面^[5],主要包括灰色关联法^[6],层次分析法^[7],物元模型^[8],三角模型^[9],主成分分析法^[10],生态足迹法^[11],景观生态学方法^[12]和生态系统服务价值^[13]等。所用评价体系大多采用“压力—状态—响应”(Pressure-State-Response, P-S-R)^[14-15],鉴于P-S-R模型难以把握系统结构与决策过程,本质与机理研究不足,欧洲环境署对P-S-R模型修正后提出“驱动力—压力—状态—影响—响应”(Driving force-Pressure-State-Impact-Response, D-P-S-I-R)^[16]概念模型。D-P-S-I-R模型从系统角度看待人和生态系统的相互关系,具有较强的系统性和综合性,有利于反映土地生态安全的系统过程。

本研究在梳理国内外相关研究的基础上,选取西北干旱生态脆弱区——精河县为研究区,分析2005—2014年的土地利用/覆被动态变化;在此基础上,构建精河县D-P-S-I-R评价指标体系,并利用层次分析法确定指标权重,应用综合指数法实现30 m×30 m栅格水平的土地生态安全综合评价,以期揭示精河县土地生态安全状况的时空格局,展布不同土地利用/覆被类型的土地生态安全状况,探讨土地生态安全变化原因,为精河县经济—生态协调发展、土地利用规划提供依据。

1 研究区概况

精河县位于新疆维吾尔自治区西北部,准噶尔盆地西南边缘,天山支脉婆罗科努山北麓,东经81°46′—83°51′,北纬44°02′—45°10′,行政区划上属于博尔塔拉蒙古自治州。精河县地形南高北低,艾比湖周边海拔最低为189 m,南部山区海拔最高处4 180 m。自南向北呈扇状坡面,南部为山区,中部为平原,中部山前冲积—洪积倾斜平原,北部冲积—洪积平原,地形平坦、开阔,大部分地下水位偏高,多为盐碱沼泽地带,艾比湖在扇形下缘最北;南部为山区,属婆罗科努山及其支脉;有精河、大河沿子河、托托河、阿恰勒河等四条较大河流及艾比湖等水系^[17]。精河县气候属典型的北温带干旱荒漠型大陆性气候,主要特点是光照

充足,冬夏冷热悬殊,昼夜温差大,干燥少雨,蒸发量大,春季多风沙、浮尘天气;日照时间长,年日照多达2 700 h,无霜期达170 d,1月份平均气温-15℃,7月份平均气温26℃,极端最低气温为-34℃,极端最高气温为42℃;年平均降水量102 mm。

2 数据来源与处理

2.1 数据来源

本研究选取的遥感数据分别为2005年9月4日、2011年9月11日以及2014年10月2日的美国陆地卫星Landsat TM/ETM+/OLI多光谱影像,ASTER GDEM数据,MODIS NDVI月合成产品。社会经济等数据来源于2005—2015年《精河县统计年鉴》以及相关职能部门的统计数据。另外,本研究的数字影像数据有:新疆土壤质地图,精河县1:50 000地形图。

2.2 数据预处理

2.2.1 遥感影像预处理 借助软件ENVI 4.8对3期影像进行预处理:利用精河县2014年1:50 000的地形图对2014年的遥感影像进行几何校正^[18],再以2014年的遥感影像为基准,分别校正其他2幅遥感影像,使得2005年、2011年影像的误差在0.5个像元之内,精度符合研究标准。本文结合团队野外工作及精河县土地利用程度,将精河县土地利用/覆被(Land Use/Land Cover, LULC)分为5类:耕地、林草地(林地和草地),水域、盐渍地、其他(荒漠、戈壁、建设用地等),利用最大似然监督分类对3期影像进行分类。分类后对其精度进行检验,3期影像分类后总精度分别为94.69%,95.50%和96.82%,Kappa系数分别为0.93,0.93,0.96,总体精度大于90%满足研究需要。

2.2.2 社会经济数据预处理 本文的评价指标既有正向指标又有逆向指标,因此在进行指标的处理上有所区分。本文采用极差归一化法进行指标的标准化^[19],其公式为:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min j}}{X_{\max j} - X_{\min j}} \quad (1)$$

$$Y_{ij} = \frac{X_{\max j} - X_{ij}}{X_{\max j} - X_{\min j}} \quad (2)$$

式中: Y_{ij} 为标准化后的值; X_{ij} 为第*i*年第*j*项指标原始值; $X_{\max j}$ 和 $X_{\min j}$ 分别为相应指标的最大值和最小值。

3 评价指标体系及评价标准

3.1 构建精河县土地生态安全评价指标体系

本文根据D-P-S-I-R框架模型,逐层分解为3个层次:目标层、准则层和指标层^[14-16,19]。精河县土地生态安全为评价目标层,准则层为:驱动层、压力层、

状态层、影响层和响应层。其中,驱动层指标是造成土地生态安全变化的自然条件和人类活动;压力层指标反映人类经济、社会活动给区域土地生态系统造成的压力;状态层指标反映当前土地生态系统的资源、环境状态;影响层指标是土地生态系统所处的状态对社会经济、人类生存等的影响;响应层指标反映人类社会为土地生态系统可持续发展,所采取的优化措施、对策及反馈。本研究根据土地生态安全的概念,

结合西北干旱地区社会经济发展、自然条件、D-P-S-I-R 模型等,依据指标数据的可得性和方法的可操作性,充分考虑乡镇土地生态安全各评价因子的复杂关系,借鉴国内相关研究成果^[16,20-22],重点选取与土地生态安全密切相关的评价指标,再利用软件 SPSS 对指标进行筛选,最终确定:人口密度、人均粮食产量、NDVI,LULC 等 17 个属性特征构建精河县土地生态安全评价指标体系(表 1)。

表 1 精河县 D-P-S-I-R 评价指标体系标准及权重

目标层	准则层	指标层	代号	指标性质	指标权重	标准值	标准来源
精河县 土地生态安全 (A)	驱动层 (B ₁)	自然增长率(%)	C ₁	—	0.055	8.00	国家标准
		城市化水平(%)	C ₂	+	0.055	50.00	国家标准
		人均 GDP(万元)	C ₃	+	0.055	2.50	国家标准
		人口密度(人/hm ²)	C ₄	—	0.060	0.14	地方均值
	压力层 (B ₂)	草原载畜量(hm ² /羊单位)	C ₅	—	0.059	0.70	地方标准
		单位耕地的化肥使用量(kg/hm ²)	C ₆	—	0.058	250.00	国家标准
		单位耕地的农药使用量(kg/hm ²)	C ₇	—	0.059	10.00	国家标准
		单位耕地的地膜使用量(kg/hm ²)	C ₈	—	0.057	65.24	地方均值
	状态层 (B ₃)	年均降雨量(mm)	C ₉	+	0.061	800.00	国家标准
		土壤质地	C ₁₀	—	0.061	—	专家评分法
		坡度(°)	C ₁₁	—	0.055	—	专家评分法
		土地利用/覆被类型	C ₁₂	—	0.067	—	专家评分法
	影响层 (B ₄)	NDVI(0~1)	C ₁₃	—	0.070	—	专家评分法
		人均粮食产量(kg/人)	C ₁₄	+	0.059	400.00	国家标准
		耕地的灌溉比率(%)	C ₁₅	+	0.053	50.00	国家标准
	响应层 (B ₅)	第三产业比重(%)	C ₁₆	+	0.058	45.00	国家标准
		单位面积的机械化水平(W/hm ²)	C ₁₇	+	0.058	120.00	地方标准

注:“+”表示指标值越大,土地生态越安全;“—”表示指标值越大,土地生态越不安全;“—”表示无数据。

3.2 确定指标权重

为了突出指标体系中的敏感指标和重要指标,首先邀请 6 位在地理学、生态学、安全科学等相关领域专家对各层次指标进行两两重要程度判断比较^[7]。其中,用数值 1,3,5,7,9 表示指标 C_i较 C_j:同等重要、较重要、重要、非常重要、绝对重要,2,4,6,8 则表示它们之间的过渡情况,反之,C_j较 C_i的重要性程度用倒数表示。最后利用 DPS 数学软件处理各专家的打分值,选用层次分析法计算出各层次要素的权重值,并通过一致性检验。

3.3 评价指标标准化

3.3.1 社会经济指标标准化 针对已构建的精河县土地生态安全评价指标体系,针对社会经济指标,优先选取国际或国家标准,其次是地方“十二·五”规划的生态文明标准,再次是当年新疆均值,以确定社会经济评价指标标准值。并按照公式(3),(4)进行标准化^[19],正向指标如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_i=1 & X_i\geq S_i \\ P_i=X_i/S_i & X_i<S_i \end{cases} \quad (3)$$

逆向指标如式(4)所示。

$$\begin{cases} P_i=1 & X_i\leq S_i \\ P_i=S_i/X_i & X_i>S_i \end{cases} \quad (4)$$

式中:P_i为第 i 个指标标准化后的值;X_i是第 i 个评价指标;S_i是该指标的基准值。当正向指标大于基准值、逆向指标小于基准值时,判定该指标安全,P_i取值范围(0,1]。

3.3.2 空间数据指标标准化 为凸显土地生态安全在乡镇单元内部的差异性,需利用影像数据计算土地生态安全指数,使土地生态安全指数达到空间化效果。影像数据无法像社会经济数据利用给定公式进行标准化。而在影像数据中,有的指标采用数值分级,有的指标采用类别分级^[15]。对于前者,首先判断是否可确定其安全标准值,然后再进行量化分级赋值,例如坡度,根据坡度对各社会分工的影响,可视 0°~5°为安全标准值,赋值为 1,不同坡度根据表 2 逐一分级。MODIS NDVI 合成产品的取值范围是 0~1,将 NDVI 按安全等级均分,依次为:0.8~1(安全),0.6~0.8(较安全),0.4~0.6(临界安全),0.2~

0.4(较不安全),0~0.2(不安全)。针对类别属性进行分级的指标,如 LULC 和土壤质地,因没有哪一类是完全安全的,故最高的量化值仅为 0.9,按照等级差异从 0.9,0.7,0.5,0.3,0.1 依次赋值(表 2)。

表 2 精河县土地生态安全评价部分指标标准

评价指标	评价等级				
	安全	较安全	临界安全	较不安全	不安全
LULC	水体	林草地	耕地	盐渍地	其他用地
坡度/(°)	0~5	5~10	10~15	15~25	>25
NDVI	0.8~1.0, 水体	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
土壤质地	基岩、湖泊、冰川雪被	壤质	砾质	黏质	沙质

3.4 土地生态安全指数

运用综合指数法^[22],根据公式(5),计算精河县各乡镇的土地生态安全指数:

$$LES = \sum_{i=1}^n P_i \times w_i \tag{5}$$

式中:LES 为土地生态安全指数; P_i 为第 i 个指标标准化后的值; w_i 是第 i 个指标的权重。

3.5 评判标准

按照区域土地生态安全综合指数高低及生态系统演变特征,结合研究区生态系统状况并参照相关文献^[15],为使评价结果更直观、更有利于分析对比,利用自然断点法将土地生态安全程度由低到高^[22]依次划分为不安全、较不安全、临界安全、较安全、安全 5 个评价等级(表 3)。

表 3 精河县土地生态安全评价等级标准

安全程度	等级	分值	特征
安全	I	[0.75,1]	区域土地生态安全水平高,适宜区域生态系统可持续发展
较安全	II	[0.65,0.75)	区域土地生态安全水平较高,适合区域生态系统发展
临界安全	III	[0.55,0.65)	区域土地生态安全水平一般,能够满足区域生态系统一般需要
较不安全	IV	[0.45,0.55)	区域土地生态安全水平较差,勉强支撑区域生态系统的需要
不安全	V	[0,0.45)	区域土地生态安全水平差,不能满足生存发展需求

4 结果与分析

4.1 精河县土地利用/覆被类型时空变化分析

利用软件 ENVI 生成精河县 2005 年、2011 年和 2014 年土地利用/覆被空间格局(图 1),统计各土地利用/覆盖类型面积及百分比(表 4)。研究区土地利用程度较低,以盐渍地和其他地类为主,占县域总面

积的近 70%;林草地面积比重较大,约占全县面积的 15%左右;耕地和水体面积相对较少。精河县的土地利用/覆被空间分异明显,耕地所处绿洲中心区域,呈大片连续状;林草地处于绿洲边缘及山区,呈零星分布;盐渍地多处于绿洲外围区域的绿洲—荒漠交错带、艾比湖周边湿地区域;其他用地则呈大片连续状分布在绿洲与山区之间。

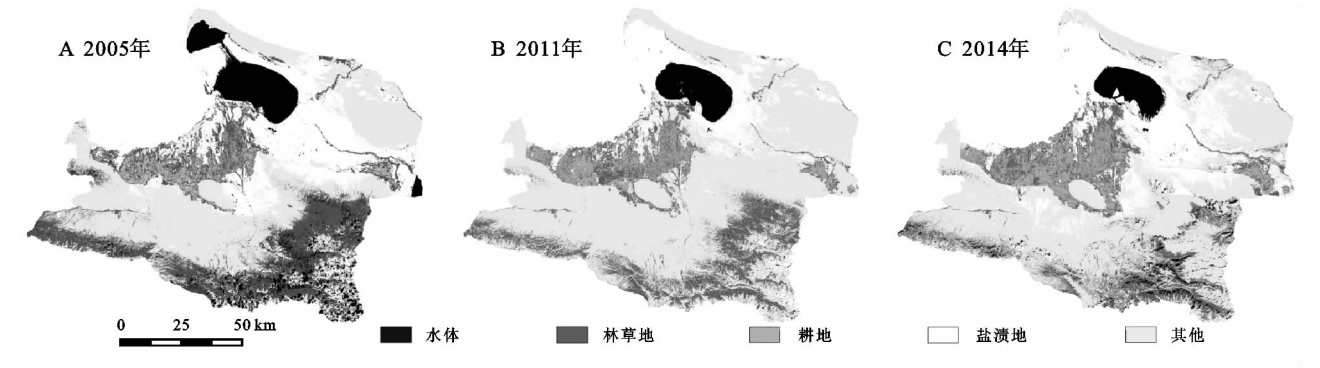


图 1 精河县土地利用/覆被空间格局

精河县自 2005—2014 年,耕地呈向周围扩张趋势,面积持续增加,尤其在 2011—2014 年,耕地增加了 193.66 km²,增幅达 42.22%,主要是由于新疆作为我国后备粮食储备基地,在相关政策调控下,努力发展第一产业,提高国民粮食安全保障能力。水体、林草地和盐渍地面积均呈先减少后增大的趋势,10 a 来分别减少了

49.70%,30.39%,12.42%,水体面积的缩小不仅是因为农业用水的增加,区域降水量降低也是主要原因之一;干旱区的林草地易受区域环境影响,精河县林草地面积减少说明区域生态环境恶化;2011 年盐渍地面积最小,说明 2011 年艾比湖湿地生态系统受盐渍化影响较小,土地生态系统状况得到改善。其他地类面积增加了

1 512.61 km², 主要由盐渍地和林草地转化而来, 其主要原因是干旱区干燥的气候条件以及林草地景观属性脆弱, 易被外界因素影响、破坏。

表 4 精河县土地利用/覆被类型面积

土地利用/ 覆被类型	2005 年		2011 年		2014 年	
	面积/ km ²	百分比/ %	面积/ km ²	百分比/ %	面积/ km ²	百分比/ %
水体	1369.95	12.19	491.41	4.37	688.83	6.13
耕地	357.06	3.18	458.65	4.08	652.31	5.81
林草地	2241.00	19.94	1891.45	16.84	1559.24	13.88
盐渍地	3590.77	31.96	1857.09	16.53	3144.78	27.99
其他	3677.15	32.73	6536.33	58.18	5189.76	46.19

4.2 精河县土地生态安全综合评价

基于 D-P-S-I-R 评价指标体系, 利用公式(5) 计算得出 2005 年、2011 年和 2014 年精河县的土地生

态安全指数分别为:0.57,0.55,0.63,再根据表 3 对精河县土地生态安全状况进行分级(图 2)。

从区域分布(图 2)上看,精河县土地生态安全等级呈南部绿洲区域、艾比湖较高,北部戈壁、荒漠地区低的空间特点,其差异主要体现在南部地区自然条件优于北部区域。南部绿洲区域,生态环境优越,植被覆盖度高,地形平坦,人类社会与自然环境和谐发展;北部地区虽然地形平坦,水资源丰富,但受到湖面萎缩和地下水水位上升的影响,形成了严重的盐渍化现象,使得北部的土地生态安全等级较低,另外,北部地区有大面积荒漠戈壁区,恶劣的自然环境是其土地生态安全等级较低的主要原因。为了解精河县土地生态安全的具体状况,统计精河县 2005—2014 年不同安全等级面积变化(表 5)。

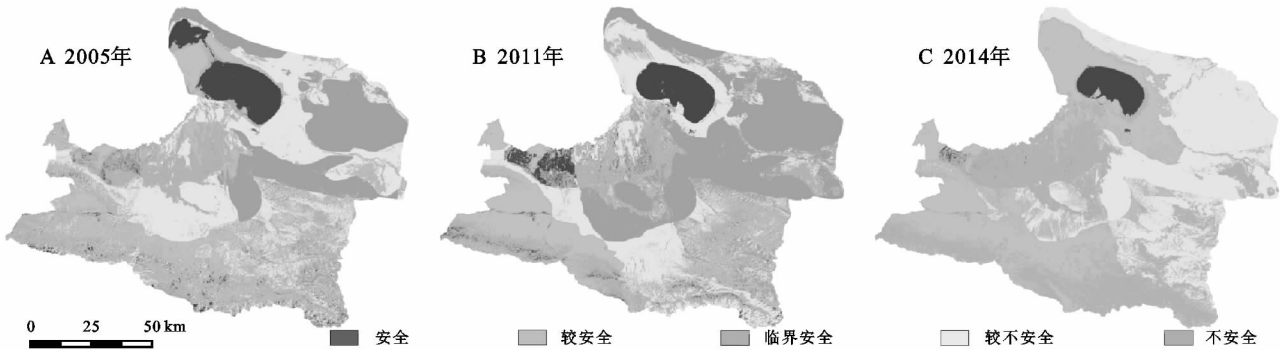


图 2 精河县土地生态安全示意图

表 5 精河县土地生态安全状况

安全 水平	2005 年		2011 年		2014 年	
	面积/ km ²	百分比/ %	面积/ km ²	百分比/ %	面积/ km ²	百分比/ %
I 级	787.37	7.03	759.81	6.77	343.16	3.06
II 级	1489.02	13.29	1515.55	13.51	2277.46	20.30
III 级	3035.85	27.09	2214.51	19.74	4559.63	40.64
IV 级	3579.74	31.94	2798.61	24.94	4036.91	35.98
V 级	2315.41	20.66	3931.16	35.04	2.56	0.02

土地生态安全得到了一定提高。2014 年各生态安全等级分布面积由大到小排序为临界安全区>较不安全区>较安全区>安全区>不安全区。精河县土地生态安全现状仍不乐观。

4.3 精河县不同土地利用/覆被安全变化分析

2005—2014 年,精河县不同土地利用/覆被的土地生态安全状况如下图(图 3)。水体的土地生态安全状况最优,处于安全水平,耕地和林草地处于较安全水平,盐渍地和其他用地处于不安全水平。近十年来,水体的生态安全状况变化不大,主要原因是水体在干旱区的土地生态系统中的重要程度高,对土地生态系统的合理运转具有重要作用;耕地的土地生态安全值呈上升趋势,主要原因是:自国家确定新疆为我国后备粮食储备基地后,将优质农田规划为基本农田,实施重点保护,虽然耕地生态系统的稳定性较差,但随着相关职能部门的规划和保护,耕地生态系统趋于稳定式发展;林草地的土地生态安全值下降显著,其主要原因是随着耕地的开发,灌溉用水需求加剧,地下水位抬升,区域非农田系统的持水量降低,导致区域部分地区生态系统遭到破坏,区域生态环境恶化,林草地面积逐年缩减;盐渍地和其他用地因无法提供适宜多数

2005—2014 年,精河县土地生态安全状况先恶化后改善,总体向好的方面转变,从表 5 可以看出,精河县安全区呈退化趋势,主要原因是艾比湖湖面面积减少,水面退化为盐渍地和干涸湖床,导致周边区域地下水水位上升,艾比湖流域的气候条件比较恶劣,因此周边区域转化为临界安全区;另外,临界安全区的面积从 2005 年的 3 035 km² 增加到 2014 年的 4 559.63 km², 主要分布在艾比湖东部和南部。较安全区面积的增加是区域土地生态安全状况改善的主要原因,增加区域主要分布在绿洲北部,受农业开发和合理灌溉的影响,原绿洲北部的盐渍地区域改良成高产良田,区域生态环境得到改善;同时,不安全区改善良好,多数转化至临界安全区和较不安全区,区域

动植物的生长空间,故其土地生态系统简化,生物多样性差,环境恶劣,受自然条件影响较强。

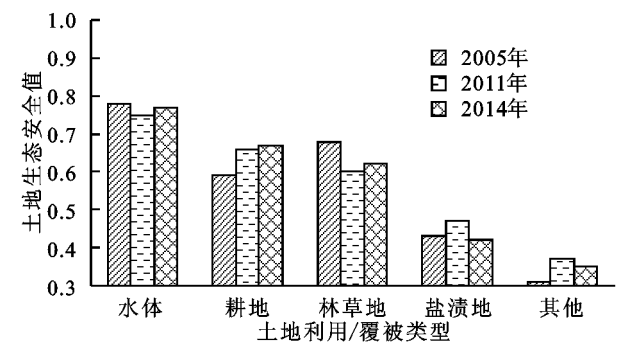


图 3 精河县土地利用/覆被安全状况

5 结 论

(1) 精河县耕地呈向周围扩张趋势,面积持续增加;而水体、林草地面积呈减少的趋势,盐渍地、荒漠戈壁区域限制了区域生态系统的良性发展,区域生态环境恶化。

(2) 2005—2014 年,精河县土地生态安全状况先恶化后改善,总体向好的方面转变,但其分布格局极不平衡,临界安全和较不安全区主要集中在艾比湖东部和东南部的荒漠区域和精河绿洲西部的戈壁区域;安全和较安全区主要为艾比湖和精河绿洲。

(3) 水体、耕地和林草地是精河县土地生态安全指数较高的地类,而那些人类活动难以改善的区域则相对较低。

参考文献:

[1] IIASA. Modeling land use and land cover change in Europe and Northern Asia[R]. 1999Research Plan, 1998.

[2] Turner B L. Local faces, global flows; the role of land use and land cover in global environmental change[J]. Land Degradation & Development, 1994,5(2):71-78.

[3] Hughey K F D, Cullen R, Kerr G N, et al. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70 (1):85-93.

[4] Christiansen F. Food security, urbanization and social stability in China[J]. Journal of Agrarian Change. 2009, 9(4):548-575.

[5] Liu Dan, Chang Qing. Ecological security research progress in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(5): 111-121.

[6] 张家其,葛咏,吴宜进,等. 武陵山区生态安全格局演变分析[J]. 地球信息科学学报,2016,18(3):315-324.

[7] 钟振宇,柴立元,刘益贵,等. 基于层次分析法的洞庭湖生态安全评估[J]. 中国环境科学,2010,30(S):41-45.

[8] 赵宏波,马延吉. 基于变权—物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究:以吉林省为例[J]. 生态学报,2014,34(16):4720-4733.

[9] 张小虎,牛海鹏,郭增长. 基于三角模型的城市土地生态安全区域差异分析:以河南省为例[J]. 自然灾害学报, 2014,23(2):21-30.

[10] 杜忠潮,韩申山. 基于主成分分析的土地生态安全评价实证研究:以陕西省 10 个省辖市为例[J]. 水土保持通报,2009,29(6):198-202.

[11] 黄海,刘长城,陈春. 基于生态足迹的土地生态安全评价研究[J]. 水土保持研究,2013,20(1):193-196.

[12] 张飞,特依拜·塔西甫拉提,曹鑫,等. 干旱区内陆艾比湖流域景观格局时空变化及生态安全评价[J]. 水土保持通报,2015,35(1):249-255.

[13] 何玲,贾启建,李超,等. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算[J]. 应用生态学报,2016,27 (1):215-224.

[14] 解雪峰,吴涛,肖翠,等. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价[J]. 资源科学,2014,36(8):1702-1711.

[15] 蒙古军,赵春红,刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价:以鄂尔多斯市为例[J]. 自然资源学报, 2011,26(4):578-590.

[16] 徐美,朱翔,李静芝. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的湖南省土地生态安全评价[J]. 冰川冻土,2012,34(5):1265-1272.

[17] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等. 干旱区绿洲土地利用/覆被及景观格局变化特征:以新疆精河县为 [J]. 生态学报,2009,29(3):1251-1263.

[18] 陈趁新,胡昌苗,霍连志,等. Landsat TM 数据不同辐射校正方法对土地覆盖遥感分类的影响[J]. 遥感学报,2014,18(2):320-334.

[19] 张永利,吴宜进,王小林,等. 内蒙古贫困地区生态安全评价及空间格局分析[J]. 地球信息科学学报,2016,18 (3):325-333.

[20] 王宏卫,安秀峰,索菲娅,等. 基于乡镇尺度的克里雅河绿洲生态承载力分析:以于田县 13 个乡镇生态承载力为例[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(10):48-55.

[21] 王耕,苏柏灵,王嘉丽. 基于 GIS 的沿海地区生态安全时空测度与演变:以大连市瓦房店为例[J]. 生态学报, 2015,35(3):670-677.

[22] 吕建树,吴泉源,张祖陆,等. 基于 RS 和 GIS 的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. 地理科学,2012,32 (8):928-935.