

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0042

刘家福, 马帅, 李帅, 等. 基于 Landsat TM 卫星影像的中亚水体动态变化研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 81-86.
LIU J F, MA S, LI S, et al. Study on the dynamic change of water in Central Asia based on Landsat-TM imagery[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 81-86. (in Chinese)

基于 Landsat-TM 卫星影像的中亚水体动态变化研究

刘家福^{1,2}, 马帅¹, 李帅¹, 任春颖², 张柏², 李京³

(1. 吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130012;
3. 北京师范大学 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 当今世界卫星遥感和图像处理技术迅速崛起并飞速发展, 利用卫星遥感数据对水资源进行分析和监测已成为必然趋势。中亚五国地处欧亚大陆核心腹地, 是丝绸之路经济带的陆上要塞, 地区内常年干旱少雨, 国家间水体面积差异显著。利用 Landsat TM/ETM+ 卫星遥感影像数据, 基于决策树分类方法, 进行提取中亚水体信息, 选取中亚主要湖泊、河渠作为典型研究区, 研究 2000 年、2010 年和 2015 年的水体动态变化。研究结果表明, 中亚水体总面积为 123 984 80 km², 其中湖泊面积为 111 856 63 km², 河渠面积为 6 323 59 km², 自然坑塘面积为 5 804 58 km², 湖泊、河渠和自然坑塘面积分别占中亚水体总面积的 90.21%、5.10% 和 4.68%; 中亚地区除乌兹别克斯坦国水资源充足外, 其余国家水资源相对匮乏; 典型研究区中咸海、额尔齐斯河和乌拉尔河变差系数相对较大, 分别为 41.18%、24.82% 和 14.68%; 总体来看, 中亚水体面积正逐年减少, 研究中亚水体分布及动态变化有助于推进“一带一路”战略。

关键词: 遥感; 水体面积变化; 中亚

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0081-06

Study on the dynamic change of water in Central Asia based on Landsat TM imagery

LIU Jiafu^{1,2}, MA Shuai¹, LI Shuai¹, REN Chunying², ZHANG Bai², LI Jing³

(1. College of Tourism and Geographical Sciences, Jilin Normal University, Siping 136000, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: At present, with the rapid development of remote sensing and image processing technologies, using remote sensing data for analyzing and monitoring water resources has become an inevitable trend. The five Central Asian countries are located at the core of Eurasia, and are considered as a stronghold of the "Silk Road" economic belt. They have little rainfall all the year round, and differ greatly in water area. Based on Landsat TM/ETM+ imagery, using the method of decision tree classification, we extracted the information of Central Asian water, and selected the major lakes and canals of Central Asia as the typical research areas to study the change of water area in 2000, 2010, and 2015. The results demonstrated that the total water area of Central Asia is 123 984.80 km², which includes 111 856 km² of lake area, 6 323.59 km² of river area, and 5 804.58 km² of pond area. These three types respectively accounted for 90.21%, 5.10%, and 4.68% of the total water area. In addition, while Uzbekistan has abundant water resources, the other countries in Central Asia are all relatively short of water resources. Among the typical areas, the Aral Sea, Irtysh River, and Ural River have large coefficients of deterioration, which are 41.18%, 24.82%, and 14.68% re

收稿日期: 2017-09-19 修回日期: 2018-01-19 网络出版时间: 2018-01-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180126.0848.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41471148; 41771383); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-08-02); 吉林省科技发展计划项目(201502040475F)

Funds: National Natural Science Foundation of China (41471148; 41771383); Key Deployment Project of the Chinese Academy of Sciences (KZZD-EW-08-02); Key Science and Technology Research of Jilin Province (201502040475F)

作者简介: 刘家福(1975-), 男, 吉林敦化人, 副教授, 博士(后), 从事遥感与 GIS 在资源环境、自然灾害等领域的应用研究。E-mail: liujiafu750506@126.com

spectively. Generally, the water area is decreasing year by year in Central Asia. The study on the distribution and dynamic change of water resources in Central Asia can contribute to "The Belt and Road" strategy.

Key words: remote sensing; water area change; Central Asia

水资源是社会健康稳定发展的基本条件,是制约区域发展的重要因素。天然形成的湖泊、江河以及人工挖掘的河渠、水库等构成了内陆地表水体^[1-3]。天然的湖泊和自然坑塘不仅可以提供水源还能改善环境、调节河川径流等。中亚作为“一带一路”的关键节点,正在成为中国当代对外知识视野和知识需求日益关注的重要区域,由于地区内严重干旱以及缺乏交通上的自然通道,隔开了周围的中国、印度、伊朗和俄国等文明,因此,了解中亚的水体分布及面积变化是中亚建设的前提与基础^[4]。在全球变暖背景下,随着社会经济的发展和城市人口的增长,水体面积受到降雨量减少、蒸发量增加、围湖造田不加节制等因素影响,中亚水体的分布格局和水体特征会产生一系列重要变化^[5-7]。因此研究中亚水体动态变化具有重要的理论意义和现实意义。

目前常用水体信息提取方法主要有:单波段阈值分割法、多波段谱间结构关系法、监督分类法、人工目视解译法等,然而,由于存在“同物异谱,异物同谱”现象,这种完全依赖地物光谱特征的分类方法往往会出现较多错分、漏分情况;决策树分类法的分类规则易于理解,分类过程也符合人的认知过程,能够比较好地解决上述分类所产生的问题^[8]。卫星遥感调查具有视点高、视域广及成本低等优势,为大规模水体监测提供更加优质、科学和高效的服务^[9]。本文利用卫星遥感影像数据,通过决策树分类方法提取中亚内陆水体信息,并对中亚地区主要湖泊、河渠进行动态监测,然后分析对比2000年、2010年和2015年三年的水体面积变化情况,从而掌握了解中亚水资源的分布特点,为保护和利用中亚水资源提供理论基础。

1 研究区概况

中亚位于亚洲中部那日路地区,是“丝绸之路经济带”核心区域^[10]。中亚是指里海以东,西伯利亚以南,伊朗、阿富汗以北及中国新疆以西的亚洲中部地区,包括哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和土库曼斯坦五个国家,总面积近400万km²,人口约为5000多万。中亚五国东南部为山地,地震频繁,属山地气候,其余地区为平原和丘陵,沙漠广布,气候干旱。从地形图(图1)可以看

出,中亚国家分成两部分,一部分是西部的低地国家,包括哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦;另一部分是东部的高地国家,包括吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦。中亚河流大多属于跨多国的内陆河,主要靠冰雪融水补给,水量很小,大部分属于咸海流域^[11-13]。咸海是中亚两条最大内陆河—阿姆河和锡尔河的终端湖,阿姆河流经塔吉克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦,部分河段形成塔吉克斯坦和阿富汗及乌兹别克斯坦的边界,锡尔河向西穿越塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦的领土,向西北穿过哈萨克斯坦注入里海。

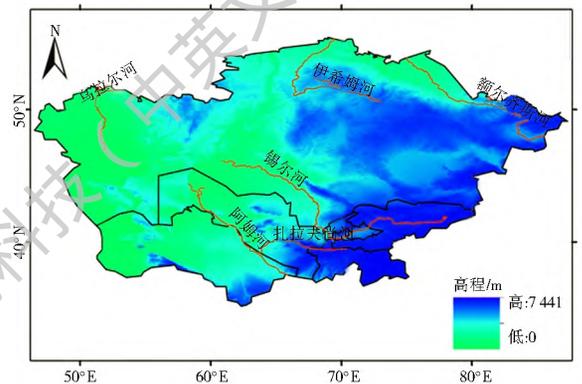


图1 中亚地形及主要水体分布

Fig. 1 The topography of Central Asia and distribution of main water bodies

中亚水资源分布不均匀,河流下游国家的水资源短缺,对地表水体面积变化产生重要影响^[14]。本文选取乌拉尔河、额尔齐斯河、阿姆河、锡尔河、咸海和巴尔喀什湖为本文典型研究区域,把湖泊、河渠作为典型研究对象。由于在短时间内大面积的水体面积变化不明显,因此选择“一带一路”战略前后2010年和2015年6月-9月的遥感影像提取水体信息,得出2000年、2010年及2015年之间水体的面积变化。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文利用Landsat-TM/ETM卫星遥感影像,下载覆盖中亚的276景遥感影像,纬度范围约为35°N-55°N,经度范围约为45°E-85°E,空间分辨率为30m。中亚大陆地区的遥感影像获取时间是2000年,典型研究区的遥感影像时间为2000

年、2010 年和 2015 年,所有的遥感影像选取时间是 6 月-9 月份,云量小于 10%,单景影像若不能获得规定时间数据,则推至相邻月份进行获取。本文遥感影像数据均来自于美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS)。

2.2 决策树分类

决策树分类是通过数学统计方法以及专家经验总结等方式,利用卫星遥感图像以及空间数据,最后获得地物分类规则的一种分类算法^[15-16]。本文利用 ID3 算法对分类规则进行获取(图 2),设 D 为类别对校验元组进行的划分,那么 D 的熵表示为:

$$\text{info}(D) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i) \quad (1)$$

式中: p_i 代表第 i 个类型在校验组中出现的概率,那么 A 对 D 划分的期望为:

$$\text{info}_A(D) = \sum_{j=1}^n \frac{|D_j|}{|D|} \text{info}(D_j) \quad (2)$$

而信息增益即为两者的差值:

$$\text{gain}(A) = \text{info}(D) - \text{info}_A(D) \quad (3)$$

通过信息增益比率进行属性选择,不仅克服了以往用信息增益选择属性时单一偏向取值的不足,而且对剪枝方法进行了优化,极大方便了对连续数据属性进行离散化处理^[17-20]。以 Landsat TM 数据为基础,计算像元的归一化植被指数 (NDVI) 值,然后对水体进行分类,根据大量实践经验获取水体的分类规则为: $\text{NDVI} \leq 0.3$, 波段 4 的 DN 值大于 0 而小于 20。

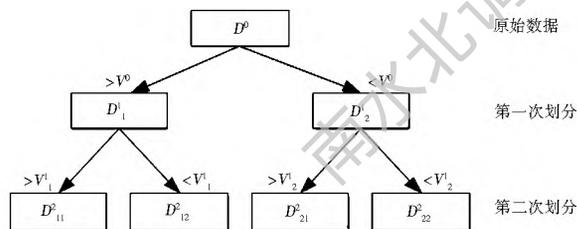


图 2 分类规则基本思路

Fig. 2 Basic idea of classification rules

2.3 水体信息提取

利用 ENVI 软件进行水体信息提取工作,在 Landsat 影像上,进行波段计算,根据波段比值图,选择合适的阈值,保证较好的提取效果,确定阈值后,利用决策树方法进行分类,再将分类结果进行合成,对水体属性较模糊的区域,则参照 Google Earth 进行归类修改。

湖泊是指陆地表面洼地积水形成的宽广、换流缓慢的水域,面积较大,其外形略成圆形或椭圆形;坑塘分为自然坑塘、人工坑塘和半人工坑塘,坑塘的

长度和宽度相差无几,面积较小,自然坑塘是由天然水体、泡子等自然形成的水面,人工坑塘一般为养鱼人工修建,半人工坑塘一般是拦截溪流或沟渠等建坝而成的水面;河渠指河流或人工开发的河道或水沟,形状多为线性,长宽对比明显;本文不考虑人工坑塘与大坝,仅按面积和形状将水体分为河渠、湖泊和自然坑塘。在此基础上,水体信息提取后面积小于 1 km^2 的分为自然坑塘,面积大于 1 km^2 的分为湖泊,面积大于 1 km^2 而形状绵长曲折的水体分为河渠。

3 研究结果

3.1 精度评价

由于实地考察获取地面信息难以实现,因此我们采用替代的方法获取地面点信息,从而评估地面水体的提取精度^[21-23]。本研究一共选取了 508 个验证样本,随机采样不同的水体类型,然后在 Google Earth 上验证其对应年份真实地表类型,最后用混淆矩阵表征中亚水体信息的提取精度。

从混淆矩阵的评价结果(表 1)可知,3 种类型水体的分类精度均较高,总精度为 96.06%, Kappa 系数为 0.94。河渠的分类精度为 93.51%,湖泊的分类精度达到 95.62%,自然坑塘的分类精度更是达到了 97.33%。

表 1 分类精度评价

Tab. 1 The evaluation of classification precision

类型	河渠 / 个	湖泊 / 个	自然坑塘 / 个	总样本数 / 个	制图精度 (%)	Kappa 系数
河渠	101	4	3	108	93.51	0.94
湖泊	2	131	4	137	95.62	
自然坑塘	4	3	256	263	97.33	

3.2 水体数量与面积统计

基于 2000 年的 Landsat TM 影像解译结果(图 3)可知,中亚大陆范围内水体总面积约为 $123\,984.80 \text{ km}^2$,其中共有湖泊 2 653 个,面积为 $111\,856.63 \text{ km}^2$,占中亚水体总面积的 90.21%。大于 $1\,000 \text{ km}^2$ 的大型湖泊有 12 个,平均面积为 $6\,876.92 \text{ km}^2$,其中咸海是中亚地区最大的湖泊,面积为 $29\,358.35 \text{ km}^2$;面积在 $500\sim 1\,000 \text{ km}^2$ 的湖泊有 6 个,平均面积为 680.61 km^2 ;面积在 $100\sim 500 \text{ km}^2$ 的湖泊有 44 个,平均面积为 204.54 km^2 ;面积在 $50\sim 100 \text{ km}^2$ 的湖泊有 47 个,平均面积为 68.68 km^2 ;面积在 $10\sim 50 \text{ km}^2$ 的湖泊有 316 个,平均面积为 20.53 km^2 ;面积在 $5\sim 10 \text{ km}^2$ 的湖泊有 366

个,平均面积为 7.06 km^2 ;面积在 $1\sim 5\text{ km}^2$ 的湖泊有1862个,平均面积为 2.12 km^2 。

根据解译结果中亚共有自然坑塘96250个,总面积为 5804.58 km^2 ,占水体总面积的 4.68% 。面积在 $0.5\sim 1\text{ km}^2$ 的自然坑塘有2215个,平均面积为 0.70 km^2 ;面积在 $0.1\sim 0.5\text{ km}^2$ 的自然坑塘有

11053个,平均面积为 0.2 km^2 ;面积在 $0.05\sim 0.1\text{ km}^2$ 的自然坑塘共有9265个,平均面积为 0.07 km^2 ;面积在 $0.01\sim 0.05\text{ km}^2$ 的自然坑塘共有43723个,平均面积为 0.02 km^2 ;面积在 $0.005\sim 0.01\text{ km}^2$ 的自然坑塘共有29994个,平均面积为 0.0076 km^2 。

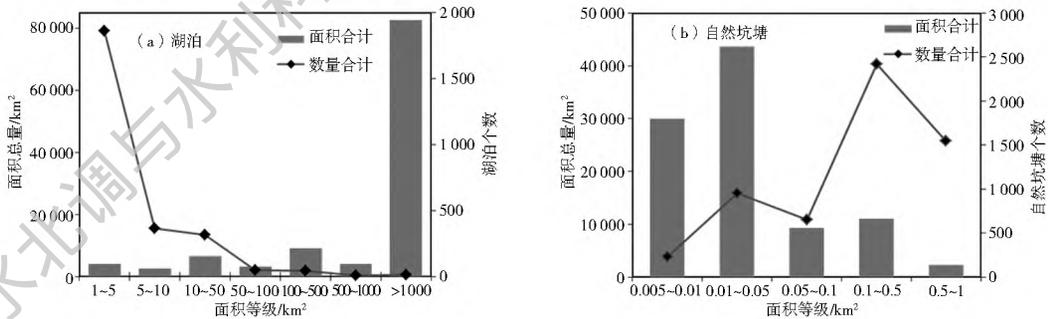


图3 湖泊与自然坑塘统计结果

Fig. 3 The statistics data of natural lakes and ponds

中亚河渠总面积为 6323.59 km^2 ,占中亚水体总面积的 5.10% ,中亚河渠大多为内流河,由于蒸发和降雨量影响,短小的内陆河较多。

3.3 水体空间分布特征提取

根据2000年影像解译统计结果(图4),可以看出中亚水体虽然总量不少,但分布极不均匀;塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦境内地势较高,多为冰川,水资源主要来源于冰雪融化形成的季节性河流;土库曼斯坦地势平坦,阿姆河支流进出境内数次,但水流量较少,不足以完全供给当地居民用水需求;乌兹别克斯坦和哈萨克斯坦地域广泛,水体类型丰富,但由于蒸发,河床渗漏和沿岸居民大量提取,大部分河水都不能够到达咸海,导致位于中亚西北部的河流三角洲地区和乌兹别克斯坦境内水资源情况日益恶化;整体来看,由于塔吉克斯坦帕米尔地区和吉尔吉斯斯坦西部天山地区山势陡峭,以及哈萨克斯坦西部地区高山林立,中亚地势具有东南高、西北低的特点,中亚水资源整体表现出西多东少,北多南少的分布特征。基于2000年遥感影像水体提取结果可知,哈萨克斯坦国共有湖泊2405个,坑塘78628个,水体总面积为 83355.39 km^2 ,水体面积占国家总面积的 3.07% ;吉尔吉斯斯坦国共有湖泊28个,坑塘4039个,水体总面积为 7581.53 km^2 ,水体面积占国家总面积的 3.82% ;塔吉克斯坦国共有湖泊26个,坑塘587个,水体总面积为 1202.66 km^2 ,水体面积占国家总面积的 0.84% ;乌兹别克斯坦国共有湖泊137个,共有坑塘6804个,水体总面积为 23384.18 km^2 ,水体面积占国家总面积的 5.22% ;土库曼斯坦国共有湖泊72个,坑塘4886个,水体总

面积为 8207.76 km^2 ,水体面积占国家总面积的 1.68% 。

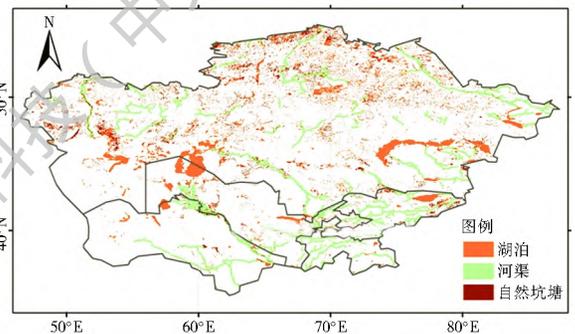


图4 中亚水体分布格局

Fig. 4 Distribution pattern of water in Central Asia

3.4 典型研究区水体面积动态变化

利用卫星遥感影像得到的大陆水体信息,代表的只是卫星瞬间过境时所获取的影像水体面积,但水体表面积会因季节气候变化和突然降雨的影响而发生变化,对水体面积的估算产生重大影响^[24-26]。本文研究内陆水体变化时仅考虑主流河,忽略其支流面积的影响。

本文选取的七个典型研究区水体在2000年的总面积为 57841.35 km^2 ,占中亚水体总面积的 46.65% ,约占中亚内陆总面积的 1.44% 。通过对比典型研究区2000年、2010年及2015年水体信息提取结果(表2),得出结论,伊塞克湖和巴尔喀什湖水体面积的变差系数小于 10% ,面积变化较小;咸海作为曾经的世界第四大湖,由于中亚五国对咸海流域用水与农业灌溉用水无休无止,咸海面积变化严重,15年面积减少高达 18052.433 km^2 ,呈逐渐消失迹象;乌拉尔河在中亚地区流域面积较小,近年

来随着降雨量不足,乌拉尔河在中亚地区也逐渐干涸;额尔齐斯河是鄂毕河最大的支流,近年来这条国际河流面积变化较大,变差系数高达 24.82%;阿姆

河和锡尔河是咸海的两条重大水源,同时是中亚两条大型的淡水河,近些年由于人们过渡取水用水且降雨量连年减少,呈现出缓慢减少趋势。

表 2 典型研究区水体面积变化对比

Tab. 2 Comparison of water area changes of typical research areas

年份	巴尔喀什湖	咸海	伊塞克湖	阿姆河	额尔齐斯河	乌拉尔河	锡尔河
2000	17 978.70	29 358.36	6 220.92	1 280.14	1 202.61	330.10	1 470.52
2010	15 738.76	14 866.33	6 192.45	1 209.36	652.49	379.36	1 263.27
2015	17 326.65	11 305.92	6 161.03	1 013.99	1 156.73	263.20	1 072.97

4 结论

(1) 利用遥感技术与 GIS 相结合,获取中亚水体的分布信息,中亚水体总面积为 123 984.80 km²,约占中亚内陆面积的 3.09%,其中湖泊约占水体总面积的 90.21%,自然坑塘约占 4.68%,河渠约占 5.10%;中亚五国的水资源分布广而不均,总体来说呈现出北多南少、西多东少的趋势,地区内严重缺水,其中哈萨克斯坦国、塔吉克斯坦国、吉尔吉斯斯坦国、乌兹别克斯坦国和土库曼斯坦国的水体面积分别占中亚水体总面积的 67.23%、6.11%、0.97%、18.86% 和 6.62%。

(2) 通过对典型研究区水体提取信息的统计可知,咸海、伊塞克湖、阿姆河和锡尔河 15 年面积呈逐渐减少趋势,水体面积的变差系数分别为 42.18%、0.40%、9.64% 和 12.79%;巴尔喀什湖和额尔齐斯河面积呈现先减少后增加趋势,水体面积变化的变差系数分别为 5.53% 和 24.82%;乌拉尔河面积呈先增加后减少趋势,水体面积变化的变差系数为 14.68%。作为“丝绸之路经济带”的核心区域,中亚水体总面积呈减少趋势。

参考文献(References):

[1] 付颖,徐新良,通拉嘎,等.近百年来北京市地表水体时空变化特征及驱动力分析[J].资源科学,2014,36(1):75-83.(FU Y, XU X L, TONG L G, et al. Spatial-Temporal Variation and Driving Forces of Surface Water in Beijing Over One Hundred Years[J]. Resource Science, 2014, 36(1): 75-83. (in Chinese))

[2] 陈亚宁,崔旺诚,李卫红,等.塔里木河的水资源利用与生态保护[J].地理学报,2003,58(2):215-222.(CHEN Y N, CUI W C, LI W H, et al. Utilization of water resources and ecological protection of Tarim River[J]. Chinese Journal of geography, 2003, 58(2): 215-222. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb200302008.

[3] 钱正英,张兴斗.中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J].中国水利,2000,2(8):5-17.(QIAN Z Y, ZHANG X D. China sustainable development strategy of water resources

comprehensive research report [J]. Chinese Water, 2000, 2(8): 5-17. (in Chinese))

[4] 胡鞍钢,马伟,鄢一龙.“丝绸之路经济带”:战略内涵、定位和实现路径[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),2014(2):1-10.(HU A G, MA W, YAN Y L. "Silk Road Economic Belt": the strategic connotation, and the realization of the path[J]. Journal of Xinjiang Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition, 2014(2): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10.14100/j.cnki.65-1039/g4.2014.02.020.

[5] 宋开山,刘蕾,吕冬梅,等.基于 Landsat TM 和 MODIS 的非洲水体分布格局研究[J].热带地理,2014,34(3):302-307.(SONG K S, LIU L, LU D M, et al. Distribution pattern of african surface water based on Landsat TM and MODIS imagery [J]. Tropical Geography, 2014, 34(3): 302-307. (in Chinese)) DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.002563.

[6] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.(XU H Q. Study on extracting water body information by improved normalized difference water index (MNDWI) [J]. Journal of remote sensing, 2005, 9(5): 589-595. (in Chinese))

[7] 白洁,陈曦,李均力,等.1975-2007年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J].湖泊科学,2011,23(1):80-88.(BAI J, CHEN X, LI J L, et al. Remote sensing analysis of Lake area change in Central Asia arid region[J]. Lake Science, 2011, 23(1): 80-88. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2011.0115.

[8] 杨明,张载鸿.决策树学习算法 ID3 的研究[J].计算机技术与发展,2002,12(5):6-9.(YANG M, ZHANG ZH. Study on the decision tree learning algorithm of ID3 [J]. Computer Technology and Development, 2002, 12(5): 6-9. (in Chinese))

[9] 赵茂盛,符淙斌,延晓冬,等.应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系[J].地理学报,2001,56(3):287-296.(ZHAO M S, FU C B, YAN G, et al. Study on the relationship between vegetation ecology and climate in China using remote sensing data [J]. Journal of geography, 2001, 56(3): 287-296. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2001.03.005.

[10] 李莉,周宏飞,包安明.中亚地区气候生产潜力时空变化特征[J].自然资源学报,2014,29(2):285-294.(LI L, ZHOU H F, BAO A M. Spatial and temporal variability of potential climate productivity in Central Asia [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(2): 285-294. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.02.010.

- [11] 姚俊强, 刘志辉, 杨青, 等. 近130年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 291-302. (YAO J Q, LIU Z H, YANG Q, et al. Temperature variability and its possible causes in the typical basins of the arid Central Asia in recent 130 years[J]. Journal of Geography, 2014, 69(3): 291-302. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb201403001.
- [12] 鄒雪英, 丁建丽, 张喆, 等. 中亚土库曼斯坦典型绿洲荒漠化动态遥感监测[J]. 自然灾害学报, 2014(2): 103-110. (YAN X Y, DING J L, ZHANG Z, et al. Dynamic remote sensing monitoring of desertification of a typical oasis in Turkmenistan of Central Asia[J]. Journal of Natural Disasters, 2014(2): 103-110. (in Chinese)) DOI: 10.13577/j.jnd.2014.0214.
- [13] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯, 等. 中亚热带常绿阔叶林林隙及其自然干扰特征的研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1126-1130. (YAN S J, HONG W, WU C Z, et al. Study on the characteristics of natural Lin Linxi and its natural disturbance in the mid subtropical evergreen broad leaf[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1126-1130. (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.2004.0238
- [14] 韩其飞, 罗格平, 白洁, 等. 基于多期数据集的中亚五国土地利用/覆盖变化分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(6): 909-918. (HAN Q F, LUO G P, BAI J, et al. Characteristics of land use and cover change in Central Asia in recent 30 years[J]. Geography of Arid Area, 2012, 35(6): 909-918. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2012.06.005.
- [15] 杨雪峰, 王雪梅. 基于决策树的多角度遥感影像分类[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(3): 416-422. (YANG X F, WANG X M. Classification of MISR multi angle imagery based on decision tree classifier[J]. Journal of Earth Information Science, 2016, 18(3): 416-422. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047.2016.00416.
- [16] 殷世平, 刘丹, 郭立峰, 等. 基于决策树的黑龙江省旱耕地分类[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 92-96. (YIN S P, LIU D, GUO L F, et al. Classification of dry cropland in Heilongjiang Province based on decision tree[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(1): 92-96. (in Chinese)) DOI: 10.13577/j.jnd.2011.0115.
- [17] 陆安生, 陈永强, 屠浩文. 决策树 C5 算法的分析与应用[J]. 电脑知识与技术: 技术论坛, 2005(3): 17-20. (LU A S, CHEN Y Q, TU H W. Analysis and application of decision tree C5 algorithm[J]. Computer Knowledge and Technology Forum, 2005(3): 17-20. (in Chinese))
- [18] 都金康, 黄永胜, 冯学智, 等. SPOT 卫星影像的水体提取方法及分类研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 214-219. (DU J K, HUANG Y S, FENG X Z, et al. Study on water extraction methods and classification of SPOT satellite images[J]. Journal of remote sensing, 2001, 5(3): 214-219. (in Chinese)) DOI: 10.11834/jrs.20010309.
- [19] 栾丽华, 吉根林. 决策树分类技术研究[J]. 计算机工程, 2004, 30(9): 94-96. (LUAN L H, JI G L. Study on classification technology of decision tree[J]. Computer Engineering, 2004, 30(9): 94-96. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2004.09.038.
- [20] SAFAVIAN S R, LANDGREBE D. A survey of decision tree classifier methodology[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2002, 21(3): 660-674.
- [21] DING Y, GONG H L. Application of normalized difference water index for vegetation water content monitoring from MODIS data[J]. Advanced Materials Research, 2011, 204-210: 2128-2132.
- [22] FEYISA G L, MEILBY H, FENSHOLT R, et al. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(1): 23-35.
- [23] VÖRÖSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J, et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth[J]. Science, 2000, 289(5477): 284.
- [24] HAAS E M, BARTHOLOMÉ E, COMBAL B. Time series analysis of optical remote sensing data for the mapping of temporary surface water bodies in sub-Saharan western Africa. [J]. Journal of Hydrology, 2009, 370(1-4): 52-63.
- [25] CAMPOS J C, SILLERO N, BRITO J C. Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara Sahel transition zone[J]. Journal of Hydrology, 2012, s 464-465(13): 438-446.
- [26] BORRO M, MORANDEIRA N, SALVIA M, et al. Mapping shallow lakes in a large South American floodplain: A frequency approach on multitemporal Landsat TM/ETM data[J]. Journal of Hydrology, 2014, 512(10): 39-52.