

塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征

朱绪超^{1,2} 袁国富^{1*} 邵明安^{1,4} 易小波³ 杜涛^{1,2}

¹中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ⁴西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100

摘要 揭示我国内陆河流域下游河岸带植被的空间结构特征, 对于了解我国西北干旱区荒漠河岸带植被的空间分布规律、指导荒漠化治理和内陆河水资源管理具有重要意义。该研究基于野外大范围植被调查数据支持下的遥感监督分类方法, 利用 Landsat-8 OLI 遥感数字图像, 辨识了塔里木河下游怪柳(*Tamarix* spp.)灌丛、胡杨(*Populus euphratica*)疏林和芦苇(*Phragmites australis*)草地3类主要的河岸带植被, 并利用建立的叶面积指数(LAI)遥感反演经验模型反演了研究区怪柳灌丛和胡杨疏林的叶面积指数, 旨在从区域尺度和总体趋势上分析荒漠河岸带植被的空间结构和分布特征。结果表明: 在有详细地物资料的基础上, 遥感监督分类可以作为一种干旱区荒漠河岸带植被分类的有效方法; 遥感分类结果显示塔里木河下游胡杨疏林分布面积约336.4 km², 怪柳灌丛约为405.3 km², 胡杨疏林总体更靠近河道, 怪柳灌丛分布范围更广; 河岸带植被LAI整体很低, 怪柳灌丛和胡杨疏林平均LAI值分别为0.253和0.252, LAI小于0.5的植被对应面积分别占怪柳灌丛和胡杨疏林总面积的92.4%和90.1%, 表明了塔里木河下游荒漠河岸带植被空间上稀疏分布的特征; 统计结果显示, 河岸带植被结构存在巨大的空间变异性, 其中胡杨疏林比怪柳灌丛的空间变异性更大; 河岸带植被LAI随距河道距离呈现显著负指数分布规律, 在离河道1 km范围内LAI随离河道距离快速下降, 而1 km外区域叶面积指数普遍低于0.1, 表明植被主要分布在河道两侧1 km范围内。整体稀疏的空间分布、显著的空间变异性, 以及由LAI体现的植被盖度随距河道距离的负指数下降规律是荒漠河岸带植被空间结构的3个基本特征。

关键词 极端干旱区, 河岸带植被, 叶面积指数, 空间分布, 监督分类, 塔里木河下游

引用格式: 朱绪超, 袁国富, 邵明安, 易小波, 杜涛 (2015). 塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征. 植物生态学报, 39, 1053–1061. doi: 10.17521/cjpe.2015.0102

Spatial pattern of riparian vegetation in desert of the lower Tarim River basin

ZHU Xu-Chao^{1,2}, YUAN Guo-Fu^{1*}, SHAO Ming-An^{1,4}, YI Xiao-Bo³, and DU Tao^{1,2}

¹Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; and ⁴College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract

Aims Revealing the spatial pattern of riparian vegetation in hyper-arid regions can improve our understanding on the water relations of riparian vegetation in the desert watershed ecosystem, and also can provide valuable scientific guidance for desertification control and water resources management of watershed of the arid region in northwestern China. This research objective is to show the spatial distribution and structures of typical riparian vegetation in hyper-arid desert watershed from regional and overall perspective.

Methods Based on Landsat-8 OLI remote sensing images and a large number of field vegetation surveys, the supervised classification method was used to distinguish three main vegetation categories in the lower Tarim River basin: *Tamarix* thicket, *Populus euphratica* woodland, and *Phragmites australis* grassland. The leaf area index (LAI) of *Tamarix* thickets and *Populus euphratica* woodlands were inverted by using the remote-sensed LAI inversion empirical model that we developed.

Important findings Supervised classification supporting abundant information of ground objects by remote sensing was an effective method to determine desert riparian vegetation categories in arid desert regions. The area was 336.4 km² for the *Populus euphratica* woodlands and 405.3 km² for the *Tamarix* thickets, respectively. The *Tamarix* thickets had a wider distribution range while the *Populus euphratica* woodlands grew near the river

channel. The overall *LAI* of the riparian vegetation was low. The average *LAI* value was 0.253 for the *Tamarix* thickets and 0.252 for the *Populus euphratica* woodlands. The areas of vegetation with the *LAI* value of less than 0.5 accounted for 92.4% and 90.1% of the total area of the *Tamarix* thickets and the *Populus euphratica* woodlands, respectively. The statistic results showed that large spatial variability of the riparian vegetation *LAI* existed. The spatial variability of the *Populus euphratica* woodlands was larger than that of the *Tamarix* thickets. The *LAI* values of the riparian vegetation had a significant negative exponential relationship with the distances away from the river channel. The *LAI* values declined rapidly within the distance of 1 km from the river channel and they were generally lower than 0.1 when the distances beyond 1 km, which indicated that the riparian vegetation was mainly distributed within 1 km from both side of the river. This research indicated three basic characteristics of the spatial pattern in riparian vegetation from hyper-arid desert regions, including overall sparse spatial distribution, high spatial variability and negative exponential relationship between *LAI* and distance away from the river channel.

Key words hyper-arid region, riparian vegetations, leaf area index, spatial pattern, supervised classification, lower Tarim River basin

Citation: Zhu XC, Yuan GF, Shao MA, Yi XB, Du T (2015). Spatial pattern of riparian vegetation in desert of the lower Tarim River basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 1053–1061. doi: 10.17521/cjpe.2015.0102

荒漠河岸带植被是干旱区一类重要的生态系统, 对于维系干旱区生态系统稳定、防治沙漠化具有重要意义。干旱区内陆河流域荒漠河岸带植被的空间分布及其结构特征通常受制于河道的形态和距离河道的远近, 反映了水分条件对荒漠河岸带植被空间结构的控制作用(Zhang *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2013)。揭示荒漠河岸带植被的空间结构特征及其与河道的关系能为干旱区内陆河水资源管理和生态恢复治理提供重要的科学依据。

目前对我国干旱区内陆河沿岸的荒漠河岸带植被空间分布特征的研究主要是利用遥感和样地调查两种手段进行的(Zhang *et al.*, 2005; Tao *et al.*, 2008; 朱军涛等, 2011; Zhu *et al.*, 2013; 白元等, 2013)。样地调查手段很难从整体和大尺度上充分揭示荒漠河岸带植被的空间分布和结构特征。利用遥感信息能方便地获取大尺度植被空间信息, 然而目前荒漠植被遥感反演研究通常较少识别不同植被类型。干旱区不同植被类型的耗水特征和水分关系差异明显(Xu *et al.*, 2007; Yuan *et al.*, 2015), 制定有效的干旱区水资源管理和生态恢复措施需要考虑这种差异。利用遥感信息提取不同荒漠植被类型的空间分布, 进而从区域尺度揭示这些植被的水分关系, 能为我们理解荒漠植被水分关系提供新的视角和认识。利用遥感信息对干旱区植被进行分类的研究已有尝试, 但是没有从植物水分关系角度和区域尺度上加以分析。已有的荒漠植被遥感分类研究基于的遥感影像的分辨率从几十米到几十千米(张旭等, 2005; 古丽·加帕尔等, 2009; 张绘芳等, 2012), 低分辨率

的遥感影像通常不易识别干旱区的植被类型, 高分辨率影像尽管较易判读不同植被类型, 但是在区域尺度上的应用受到限制。基于特定方法的Landsat卫星30 m空间分辨率的遥感影像能较好地辨识干旱区不同植被类型, 也适合在区域尺度应用。

本研究以塔里木河下游荒漠河岸带植被为研究对象, 基于Landsat 8 OLI遥感影像信息, 在大范围的地面植被调查数据的支持下, 利用监督分类法提取塔里木河下游河岸带主要植被类型及其空间分布, 反演两种主要河岸带植被——怪柳(*Tamarix* spp.)灌丛和胡杨(*Populus euphratica*)疏林的叶面积指数(*LAI*)。旨在通过对塔里木河下游河岸带植被整体空间结构的分析, 提升我们对极端干旱区荒漠河岸带植被空间分布和结构特征(以叶面积指数为指标)的认识: (1)评价基于Landsat-8 OLI遥感影像, 利用监督分类方法对干旱区荒漠河岸带植被进行分类识别的效果; (2)从区域尺度和整体角度揭示塔里木河下游主要河岸带植被的空间分布和结构特征; (3)分析并揭示荒漠河岸带植被空间格局与河流河道的关系。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

塔里木河是我国最长的内陆河, 位于新疆塔里木盆地, 发源于天山、昆仑山、帕米尔高原, 经塔克拉玛干沙漠东北缘最终流入台特马湖。研究区位于塔里木河下游段中的大西海子水库到台特马湖间生态最为脆弱的一段(图1)。该区深居亚欧大陆内部, 距离海洋较远, 属于暖温带大陆性极端干旱气候,

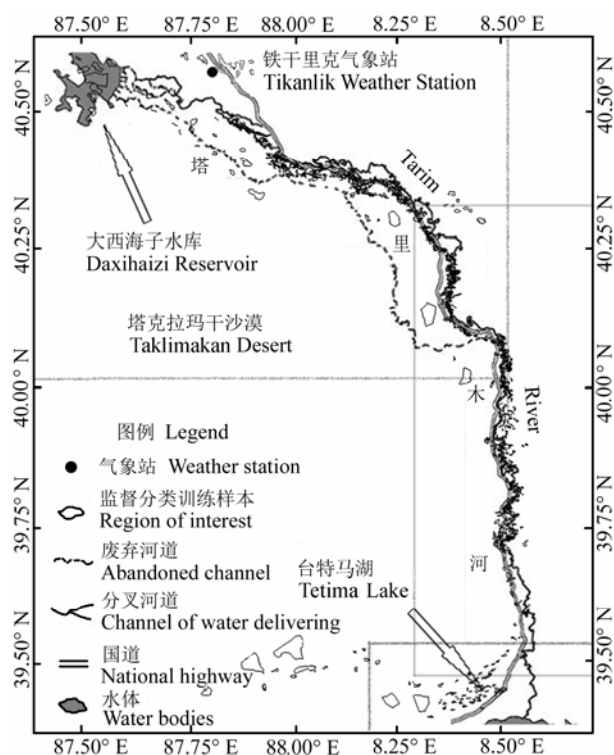


图1 塔里木河下游位置图。虚线框显示本研究采用的三景遥感影像的范围。

Fig. 1 Location of the lower Tarim River basin. The three dashed line boxes shows the scope of the selected three remote sensing images.

气候干旱, 降水稀少。根据对研究区铁干里克气象站1957–2012年观测数据的统计, 该区域多年平均降水量仅为33.7 mm, 降水最少的2001年降水量仅为3.4 mm, 最多的1974年降水量为75.7 mm, 一年中降水主要发生在6、7、8三个月, 占年降水总量的67.8%。根据气象数据计算, 研究区年潜在蒸散量(ET_0)通常是年降水量的25倍以上, 属于极端干旱区。塔里木河下游地区属于暖温带灌木、半灌木荒漠地带, 植被类型单一, 受水分条件制约, 基本沿塔里木河河道分布(张绘芳等, 2007)。主要植被类型有乔木类胡杨, 灌木类多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、刚毛怪柳(*T. hispida*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等, 半灌木植物骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)、草本植物芦苇(*Phragmites australis*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)等, 其中草本植物主要分布在河道两侧, 面积较小(古丽·加帕尔等, 2009), 胡杨和怪柳是建群种, 在数量和空间分布上占有绝对优势(张绘芳等, 2007; Yuan et al., 2014)。由于怪柳和胡杨不同的生长特性,

基本呈现出各自聚集连片分布的特点, 怪柳和胡杨混合生长的状况很少(古丽·加帕尔等, 2009; 张绘芳等, 2012)。

1.2 遥感影像和预处理

遥感数据选用从美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)官方网站下载的Landsat-8 OLI遥感影像。Landsat-8卫星于2013年2月发射升空, 与Landsat-7相比, 在波段数量、光谱范围和辐射分辨率上均进行了改进(徐涵秋和唐菲, 2013)。由于研究区范围较大, 需用三景影像进行拼接展示。荒漠河岸带植被在6–8月为生长盛期, 叶面积指数在此时期变化不大, 为最大化展现植被信息, 选取的遥感影像时间需要在这时期内。我们选取条带号和成像时间分别为142和32的主图像(2013年7月20日), 条带号和成像时间分别为141和32的辅图像(2013年6月11日)和条带号和成像时间分别为141和33的辅图像(2013年6月11日), 对3幅影像进行分析处理。影像空间分辨率为30 m, 云量覆盖度低, 总体质量较好。

下载的Landsat-8 OLI遥感影像为level 1图像, 在对图像进行分析处理之前, 需要对图像进行预处理, 主要是辐射校正和几何校正。辐射校正主要包括辐射定标、大气校正和表观反射率的计算。大气校正使用暗目标像元法, 通过在遥感图像上识别一个“黑物体(dark object)”来计算大气程辐射值, 再用每个像元值减去大气程辐射值(赵英时, 2003)。几何校正是选取17个大致均匀分布的野外实测GPS控制点对遥感影像进行位置纠正, 校正误差为0.44个像元。Landsat-8 OLI遥感影像波段反射率的计算不同于传统的TM遥感影像, 本文按照USGS官方操作文档进行计算。遥感图像预处理工作是图像分析和处理的前提, 决定着地物分类的精度。整个分析和处理过程使用遥感图像处理软件ENVI 4.6。

1.3 植被遥感分类方法及精度评价

采用Landsat-8卫星的5 (近红外)、4 (红)、3 (绿)三个波段进行解译和分类。监督分类具有操作简单、计算量小, 可充分利用先验知识等优点, 在遥感地物分类中获得了广泛的应用。选择监督分类作为研究区植被分类的主要方法, 其最重要的步骤是选择训练样本。在本研究中, 我们通过在下游全区域的大量野外植被调查和定位, 在遥感图像中准确地选择了1 024个训练样本(图1), 其中317个怪柳灌丛训

练样本、388个胡杨疏林训练样本、164个沙地训练样本、14个农田训练样本、66个水体训练样本和75个草地训练样本。监督分类过程中选用最大似然法作为我们进行分类的算法。本研究将塔里木河下游河岸林带地物分为柽柳灌丛、胡杨疏林、芦苇草地、农田、沙地和水体6类，能够包含研究区所有地物类别。利用ENVI 4.6软件对研究区遥感图像进行逐步处理，最终可得到研究区植被分类结果。

采用简单随机采样和混淆矩阵两种方法对分类结果进行精度评价(赵英时, 2003)。简单随机采样法是随机选择53块野外观测的柽柳灌丛和胡杨疏林样地，将其经纬度分别输入分类结果图中，根据准确率来判断分布最为广泛的柽柳灌丛和胡杨疏林的类别精度。混淆矩阵法是将分类结果与划分的感兴趣区作为对比来建立混淆矩阵(刘海江等, 2007)，对分类结果进行评价。尽管缺少研究区精确的参考分类图像，但是在全区域考察记录资料的基础上我们认为所选择的各类训练区是准确的。根据选取的共1 024个训练样本建立混淆矩阵，计算相关指标评价分类精度。

1.4 LAI遥感反演

2013年7月下旬，在研究区沿着塔里木河下游河道两岸大致均匀选取了60块观测样地，包括30块柽柳灌丛样地和30块胡杨疏林样地，样地大小均为50 m × 50 m。于早晨、傍晚或阴天使用植物冠层分析仪LAI-2250 (LI-COR, Lincoln, USA)测量各样地的叶面积指数，具体的样地选取原则和LAI测量中

的布点方式详见朱绪超等(2014)。研究区以芦苇为主要建群种的草本植物群落主要分布在河道边以及湖泊、水库周围，且分布面积小，在研究干旱区植物水分关系方面意义不明显。本研究仅观测了柽柳灌丛和胡杨疏林叶面积指数。利用观测的LAI值与遥感植被指数(VI)之间的关系建立适合本研究区特征和植被特点的LAI-VI模型。具体的操作处理详见朱绪超等(2014)。最后确定的柽柳灌丛的最适植被指数为归一化植被指数(NDVI)，胡杨疏林的最适植被指数为大气阻抗植被指数(ARVI)，对应的LAI遥感反演经验公式(达到显著的相关性, $p < 0.01$)分别为：

$LAI_{Tam} = -0.216 (NDVI)^2 + 5.744 NDVI - 0.356$ (1)

$LAI_{Pop} = 8.119 (ARVI)^2 + 2.036 ARVI + 0.095$ (2)

式中LAI_{Tam}为柽柳的叶面积指数，LAI_{Pop}为胡杨的叶面积指数。利用建立的LAI-VI模型，便可在ENVI 4.6软件中通过波段运算分别反演出柽柳植被和胡杨植被LAI的空间分布。

2 结果

2.1 植被分类精度评价

利用简单随机采样法得到的柽柳灌丛和胡杨疏林的类别精度为73.6%。通过混淆矩阵法得到分类精度评价表(表1)，可知6类地物类型的总体分类精度为89%，Kappa系数为0.86。

从表1中可以看出：由于沙地、农田和水体在标准假彩色遥感图像中特征典型，不论用户精度还是制图精度，均达到了90%以上；草地的分布具有趋

表1 分类类别错分漏分矩阵表
Table 1 Error matrix of wrongly and ommissively classified pixels of classification types

类别 Classification	柽柳灌丛 <i>Tamarix</i> thickets	胡杨疏林 <i>Populus euphratica</i> woodlands	沙地 Sand lands	农田 Farmlands	水体 Water bodies	芦苇草地 <i>Phragmites</i> <i>australis</i> grasslands	总和 Total	制图精度(%) Mapping accuracy
柽柳灌丛 <i>Tamarix</i> thickets	9 982	3 121	1 375	102	48	160	14 788	67.5
胡杨疏林 <i>Populus euphratica</i> woodlands	6 403	23 758	413	30	91	523	31 218	76.1
沙地 Sand lands	1 424	228	38 380	0	21	1	40 054	95.8
农田 Farmlands	8	13	0	9 881	1	33	9 936	99.4
水体 Water bodies	0	0	0	0	58 371	14	58 385	99.9
芦苇草地 <i>Phragmites australis</i> grasslands	569	1 658	23	858	2 110	15 964	21 182	75.4
综合 Total	18 386	28 778	40 191	10 871	60 642	16 695	175 563	—
用户精度 User accuracy (%)	54.3	82.6	95.5	90.9	96.3	95.6	—	—

总精度 Total accuracy = 89.0%; Kappa系数 Kappa coefficient = 0.86

标题行代表分类后图像上的类别，左边列代表参考图像上的类别。第一行列出的其他像元数表示参考图像上的柽柳被错误地指定为其他类的像元数量，第一列中的其他像元数表示在分类后图像中被错误地指定为柽柳的其他类别的像元数量，其余行和列的数据依次类推。
The title line is the categories of the classification images and the left column is the categories of the reference images. The other pixel numbers listed in the first row are the numbers of the *Tamarix* thicket pixels on the reference images incorrectly specified as other categories. The other pixel numbers listed in the first column are the pixel numbers of other categories that were incorrectly specified as *Tamarix* thicket on the classification image. The data in the remaining rows and columns are the same as mentioned above.

水性,有着特定的聚集区域,便于划分,因此也具有较高的用户精度(95.6%),草地的制图精度相对较低,可能是因为河道两侧的旱地草本长势稀疏,几乎没有连片的分布,将其误分为胡杨或者怪柳;怪柳灌丛和胡杨疏林的分类精度相对偏低,主要是因为二者均沿河道分布,且大多长势稀疏,盖度值较低,有着与土壤类似的光谱特征,容易发生错分漏分现象。除了怪柳灌丛的用户精度为54.3%之外,其他最低精度也高于67%,总体上,分类的结果能够满足研究的需要。分类结果显示:在具有丰富地物资料的基础上,采用简单的监督分类方法具有较高的识别精度。荒漠河岸林群落结构简单,植被类型较少,这为监督分类方法辨识荒漠植被类型提供了条件。对于干旱区荒漠河岸林的植被遥感分类来说,简单的监督分类方法可以获得较满意的分类精度。

2.2 河岸植被空间分布特征

监督分类结果显示,怪柳灌丛、胡杨疏林和芦苇草地三类植被集中分布于河道两侧、大西海子水库和台特马湖附近(图2)。其中,怪柳和胡杨主要沿河道分布,呈现出胡杨靠近河道、怪柳在胡杨外围分布的总体格局特征,这在大西海子水库至阿拉干一段表现较为明显;而芦苇草地主要集中于大西海子水库和台特马湖附近,在上游段水分较充足的河段附近也有零星分布。这种分布特征体现了3类植被不同的用水策略,草类生长需要地表水,通常在地表水丰富的地方集中出现;胡杨耗水量较怪柳大(Yuan *et al.*, 2015),一般更靠近河道,怪柳沿河道与胡杨交错分布,但分布范围更广。

利用遥感分类的结果提取了研究区3种植被类型的面积信息(表2)。三类植被的总面积为1 027 km²,怪柳灌丛占地面积最大,为405.3 km²,胡杨疏林次之,为336.4 km²,芦苇草地面积为285.3 km²。

2.3 河岸植被叶面积指数的空间分布

图3显示怪柳灌丛和胡杨疏林LAI的空间分布,总体上怪柳和胡杨距离河道越远,LAI值越小。大西海子水库至阿拉干一段是生态输水(从大西海子水库进入塔河河道往下游输送)的首先流经地,水分较为充足,怪柳和胡杨生长较好,LAI值在0.17–0.50之间的植被分布相对广泛;受到河道水面蒸发、土壤侧渗补给和植物蒸腾的影响,越往下游,河道水分越少,河岸植被所处地下水位越低,植被生长越受到水分条件的限制,阿拉干至台特马湖一段植被

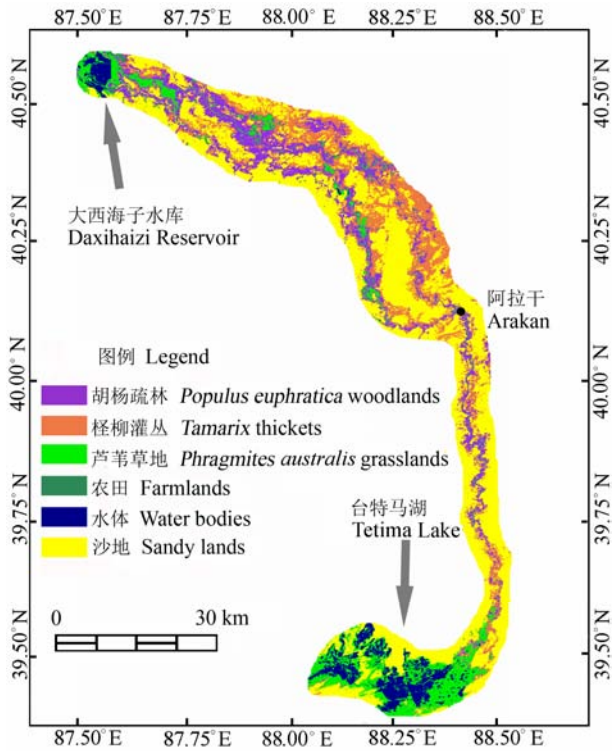


图2 研究区地物分类结果。
Fig. 2 Result of landscape classification in the study area.

表2 研究区遥感解译怪柳灌丛、胡杨疏林、芦苇草地和水体的面积
Table 2 Areas of *Tamarix thickets*, *Populus euphratica* woodlands, *Phragmites australis* grasslands and water bodies in the study area derived by remote sensing interpretation

类别 Classification	像元数 Number of pixels	面积 Area (km ²)
怪柳灌丛 <i>Tamarix thickets</i>	450 293	405.3
胡杨疏林 <i>Populus euphratica</i> woodlands	373 813	336.4
芦苇草地 <i>Phragmites australis</i> grasslands	316 968	285.3
水体 Water bodies	159 345	143.4

仅限于河道周围很小的范围,LAI值普遍较低,多在0–0.17之间(图3A)。另外从分布上看,胡杨疏林条带较为狭窄,更靠近河道分布(图3B),怪柳灌丛条带稍宽,呈小片状分布,在大西海子水库至阿拉干一段,怪柳灌丛主要分布在胡杨疏林外围区域,在靠近河道的地方也有少量分布,而在阿拉干至台特马湖一段基本在胡杨疏林外围区域稀疏分布(图3C)。

对遥感像元中怪柳灌丛和胡杨疏林的LAI值分别进行统计,可得到怪柳灌丛和胡杨疏林不同LAI值在空间上的面积占比(图4)。分析发现,怪柳灌丛和胡杨疏林的LAI值大部分小于0.5,分别占了各自总面积的92.4%和90.1%。怪柳灌丛分布面积最广的

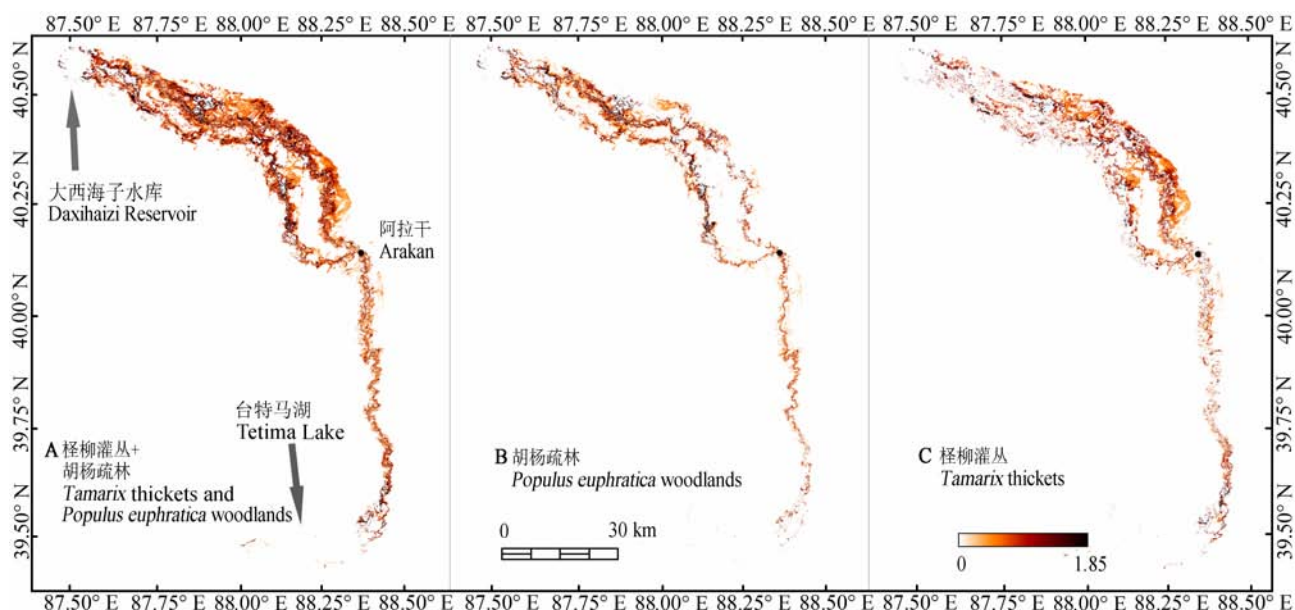


图3 塔里木河下游河岸带胡杨疏林和柽柳灌丛叶面积指数空间分布图。

Fig. 3 Spatial distribution of leaf area indices of the *Populus euphratica* woodlands and the *Tamarix* thickets in the lower Tarim River basin.

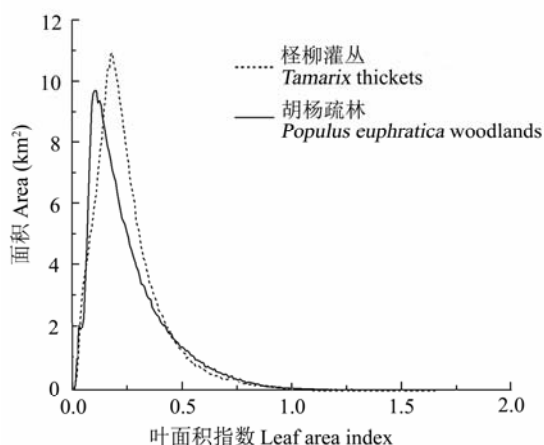


图4 研究区柽柳灌丛和胡杨疏林不同叶面积指数的空间面积占比。

Fig. 4 Areas of different leaf area indices of *Tamarix* thickets and *Populus euphratica* woodlands in the study area.

LAI 值为0.18, 对应的面积为11.0 km^2 , 胡杨疏林分布面积最广的 LAI 值为0.10, 对应的面积为9.8 km^2 (图4)。塔里木河下游地区柽柳灌丛和胡杨疏林的 LAI 值均较小, 柽柳 LAI 的最大值为1.653, 胡杨为1.849, 比柽柳 LAI 值稍大(表3)。通过统计特征值可以看出塔里木河下游荒漠河岸带植被冠层稀疏生长的特征和显著的空间变异性(表3)。从表3中还可以看出: 柽柳灌丛和胡杨疏林 LAI 的均值较为接近,

柽柳灌丛 LAI 的均值为0.253, 胡杨疏林为0.252, 但胡杨疏林 LAI 的标准差比柽柳灌丛稍大, 导致胡杨疏林的变异系数比柽柳灌丛大, 说明胡杨疏林 LAI 值的变化幅度比柽柳疏林大, 表明胡杨疏林结构的空变异性更大。整体上看, 塔里木河下游河岸带植被体现出稀疏生长的冠层特征和巨大的空间变异性。

2.4 叶面积指数随垂直于河道距离的变化

从大西海子水库到台特马湖, 沿河道大致均匀等距离地选取了20个垂直于河道的断面, 分别提取断面上离河道不同距离的 LAI 值, 将20个断面中离河道相同距离的 LAI 值进行平均, 结果可以表达塔里木河下游河岸带植被叶面积指数随距河道距离变化的总体规律(图5)。根据植被 LAI 数据判读, 塔里木河下游植被主要分布在距离河道3 km之内的范围, 且在距离河道1 km之外, 植被叶面积指数整体已经小于0.1, 显示河道以外1 km的区域, 植被已经十分稀疏。将植被 LAI 与距河道距离数据进行拟合, 得到拟合方程(图5), F 单因子检验拟合方程显示拟合结果达到极显著水平($p < 0.01$)。植被 LAI 与距河道的距离呈显著的负指数关系(决定系数 $R^2 = 0.949$), 距离河道越远, LAI 值越小, 且在河道1 km范围内 LAI 呈迅速下降趋势。

表3 研究区柽柳灌丛和胡杨疏林叶面积指数统计特征值
Table 3 Statistical characteristics of leaf area indices of *Tamarix* thickets and *Populus euphratica* woodlands

	像元数 Number of pixels	最小值 Minimum	最大值 Maximum	众数 Mode	平均值 Average	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (%)
柽柳灌丛 <i>Tamarix</i> thickets	450 293	0.005	1.653	0.182	0.253	0.158	62.3
胡杨疏林 <i>Populus euphratica</i> woodlands	373 813	0.007	1.849	0.102	0.252	0.178	70.5

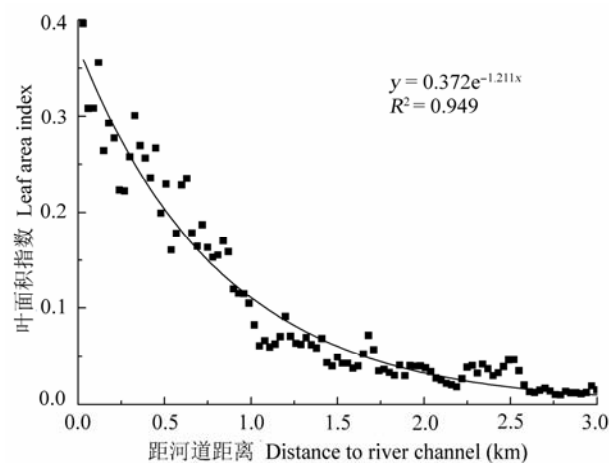


图5 叶面积指数随距河道距离的变化特征。
Fig. 5 Relationship between leaf area indices and distances away from the river channel.

3 讨论

古丽·加帕尔等(2009)采用Landsat TM遥感影像,利用较为复杂的决策树分类、几何光学模型和光谱角匹配的方法对塔里木河下游地区荒漠河岸林植被进行识别,得到的总体分类精度和Kappa系数均大于70%,而稀疏旱地草本的制图精度和灌木类的用户精度也均不到60%,与本研究的结果较为一致。多位学者曾利用不同的遥感影像对塔里木河下游植被进行过分类研究。张旭等(2005)利用EOS/MODIS影像监测塔里木河下游植被,确定从恰拉水库到台特马湖之间胡杨疏林的面积为264.6 km²,柽柳灌丛的面积为395.3 km²,比本研究的小,可能是因将稀疏柽柳灌丛和稀疏胡杨林划分为灌木荒漠类所导致。刘新华等(2013)采用CBERS遥感影像对研究区进行解译,结合野外实地调查得到的大西海子水库至台特马湖之间天然植被面积为961 km²,本研究的遥感解译结果与之非常相近。另外,本研究提取的河岸带植被空间分布特征与邓潮洲(2010)、张绘芳(2007)等人的实地调查情况也较为一致。上述研究表明,基于野外大范围植被调查下的遥感监督分类方法适用于结构简单、类型单一的荒

漠河岸带植被遥感植被分类中。

从反演的叶面积指数数据可以看出荒漠河岸带植被空间分布稀疏,反映了干旱气候下荒漠植被空间结构的固有特点(Okin *et al.*, 2015)。河岸带植被叶面积指数随距河道的距离呈负指数分布规律,植被叶面积指数距河道由近到远快速下降,且植被主要分布在河道两岸1 km范围内,这一现象反映了河道作为荒漠河岸林的主要水源对荒漠河岸林分布和空间结构的总体控制,体现了极端干旱区生态系统空间分布和结构特征的特殊控制机制。另一方面,从LAI的空间分布看,尽管LAI总体呈现出距河道距离有规律的变化特征,然而仍然可以看出许多LAI值在空间上的斑块状分布特征(图3),这个结果显示荒漠河岸带植被结构特征的巨大空间变异性,不能单纯地解释为与距河道的远近有关,其他影响荒漠河岸带植被空间结构特征的因素,尤其是河流两岸土壤属性的空间变异性对河岸带植被空间分布模式的影响值得进一步研究。

塔里木河是我国最长的内陆河,在我国西北内陆河中具有代表性和典型性。塔里木河下游河岸带植被很少受到人类开垦活动的影响,随着本世纪以来10余年生态输水工程的持续建设,下游河岸带植被逐渐得到恢复(黄粤等, 2013),因此塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征能够反映西北内陆极端干旱气候下的荒漠河岸带植被的自然状况,能够代表我国西北地区极端干旱的内陆河下游地区的河岸带植被空间结构特征。对我国内陆河流域沿岸荒漠河岸带植被空间结构的认识,有助于我们正确理解荒漠河岸林的空间分布特征,为合理实施荒漠河岸林的恢复治理、内陆河水资源的调配与管理提供科学依据。本文揭示的荒漠河岸带植被空间结构特征在荒漠河岸带植被恢复和水资源管理方面的意义在于: (1)在制定植被人工恢复措施中,必须正确理解荒漠河岸带植被空间分布的稀疏性特征,避免一味追求植被盖度等违反荒漠河岸带植被自然分布特征的治理思维; (2)需要正确理解河道孕育荒漠河岸带

植被的可能空间范围和空间变化特征, 制定合理的生态输水通道。

4 结论

利用Landsat-8 OLI遥感数字图像, 基于大量野外植被调查数据支持的训练样本选取, 将塔里木河下游河岸带相对单一植被下垫面分为柽柳灌丛、胡杨疏林、芦苇草地、农田、水体和沙地共6类, 对塔里木河下游荒漠河岸带植被进行监督分类, 用简单随机采样法对分类结果进行评价, 精度达73.6%, 用混淆矩阵进行评价, 分类的总体精度为89%, Kappa系数为0.86。分类结果与已有研究结果对比也近似, 表明简单的监督分类方法能够用于干旱区稀疏荒漠河岸带植被的遥感分类。

塔里木河下游大西海子水库至台特马湖之间胡杨疏林总面积为336.4 km², 主要分布于河道两侧, 距离河道较近; 柽柳灌丛总面积为405.3 km², 与胡杨疏林交错分布, 但分布范围更广; 芦苇草地总面积为285.3 km², 绝大部分分布在大西海子水库和台特马湖周围, 在阿拉干以上河段两侧也有零星分布。

研究区柽柳灌丛和胡杨疏林的LAI值总体上普遍较低, 统计数据显示塔里木河下游荒漠河岸带植被总体稀疏分布的结构特征和巨大的空间变异性; 植被叶面积指数随垂直于河道的距离快速下降, 呈现显著负指数分布规律, 植被主要分布在河道两岸1 km范围之内, 超过1 km范围叶面积指数总体低于0.1, 植被已经十分稀疏。荒漠河岸林植被的稀疏分布和空间变异, 以及空间分布受河道控制的特征是荒漠河岸林空间结构的基本特征, 反映了荒漠植物对干旱气候的适应性以及对河流水源的依赖性。

基金项目 国家自然科学基金(41271050)。

参考文献

- Bai Y, Xu HL, Tu WX, Ling HB, Fu JY, Wang XY (2013). Population structure and spatial distribution of the *Populus euphratica* in the mainstream of the Tarim River. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 33, 1216–1223. (in Chinese with English abstract) [白元, 徐海量, 涂文霞, 凌红波, 傅彦仪, 王希义 (2013). 塔里木河干流胡杨种群结构与分布格局研究. 西北植物学报, 33, 1216–1223.]
- Deng CZ, Zhang XM, Li L, Wu JX, Zhu JT, Liu GJ, Lü CY (2010). Community characteristics and population struc-

- ture of *Populus euphratica* Oliv in lower reaches of Tarim River. *Journal of Desert Research*, 30, 589–595. (in Chinese with English abstract) [邓潮洲, 张希明, 李利, 吴俊侠, 朱军涛, 刘国军, 吕朝燕 (2010). 塔里木河下游胡杨群落特征及种群结构分析. 中国沙漠, 30, 589–595.]
- Guli J, Chen X, Ma ZG, Chang C (2009). Classification of sparse desert riparian forest in extreme arid region. *Journal of Desert Research*, 29, 1153–1161. (in Chinese with English abstract) [古丽·加帕尔, 陈曦, 马忠国, 常存 (2009). 极端干旱区荒漠稀疏河岸林遥感分类研究. 中国沙漠, 29, 1153–1161.]
- Huang Y, Bao AM, Wang SF, Wang YQ, Duan YB (2013). Eco-environmental change in the lower Tarim River under the influence of intermittent water transport. *Acta Geographica Sinica*, 68, 1251–1262. (in Chinese with English abstract) [黄粤, 包安明, 王士飞, 王永琴, 段远彬 (2013). 间歇性输水影响下的2001–2011年塔里木河下游生态环境变化. 地理学报, 68, 1251–1262.]
- Liu HJ, Cheng WM, Long E (2007). Landscape changes in a degraded sandy land ecosystem—A case study in the Otindag Sandy Land, Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 1063–1072. (in Chinese with English abstract) [刘海江, 程维明, 龙恩 (2007). 受损沙地生态系统景观变化分析——以内蒙古浑善达克沙地为例. 植物生态学报, 31, 1063–1072.]
- Liu XH, Xu HL, Ling HB, Bai Y, Fu JY, Zhao XF (2013). Ecological water requirements in the lower reaches of the Tarim River. *Journal of Desert Research*, 33, 1198–1205. (in Chinese with English abstract) [刘新华, 徐海量, 凌红波, 白元, 傅彦仪, 赵新风 (2013). 塔里木河下游生态需水估算. 中国沙漠, 33, 1198–1205.]
- Okin GS, de Las Heras MM, Saco PM, Throop HL, Vivoni ER, Parsons AJ, Wainwright J, Peters DPC (2015). Connectivity in dryland landscapes: Shifting concepts of spatial interactions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13, 20–27.
- Tao H, Gemmer M, Song YD, Jiang T (2008). Ecohydrological responses on water diversion in the lower reaches of the Tarim River, China. *Water Resources Research*, 44, W08422, doi: 10.1029/2007WR006186.
- Xu H, Li Y, Xu GQ, Zou T (2007). Ecophysiological response and morphological adjustment of two Central Asian desert shrubs towards variation in summer precipitation. *Plant, Cell & Environment*, 30, 399–409.
- Xu HQ, Tang F (2013). Analysis of new characteristics of the first Landsat 8 image and their eco-environmental significance. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 3249–3257. (in Chinese with English abstract) [徐涵秋, 唐菲 (2013). 新一代Landsat系列卫星: Landsat 8遥感影像新增特征及其生态环境意义. 生态学报, 33, 3249–3257.]
- Yuan GF, Luo Y, Shao MA, Zhang P, Zhu XC (2015).

- Evapotranspiration and its main controlling mechanism over the desert riparian forests in the lower Tarim River Basin. *Science China Earth Sciences*, 58, 1032–1042.
- Yuan GF, Zhang P, Shao MA, Luo Y, Zhu XC (2014). Energy and water exchanges over a riparian *Tamarix* spp. stand in the lower Tarim River basin under a hyper-arid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 194, 144–154.
- Zhang HF (2007). *The Research on Plant Community Structure and Dominant Species Pattern in the Lower Reaches of Tarim River*. Master degree dissertation, Xinjiang Agricultural University, Ürümqi. 52–60. (in Chinese with English abstract). [张绘芳 (2007). 塔里木河下游植物群落结构特征及优势种群格局研究. 硕士学位论文, 新疆农业大学, 乌鲁木齐. 52–60.]
- Zhang HF, Li X, Gao YQ (2012). Population's pattern analysis based on high-resolution remote sensing images of Quick Bird. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 49, 2029–2034. (in Chinese with English abstract) [张绘芳, 李霞, 高亚琪 (2012). 基于Quick Bird数据的胡杨、怪柳种群格局分析. 新疆农业科学, 49, 2029–2034.]
- Zhang HF, Li X, Wang JG, Yang YJ (2007). The structure characteristic of the plant community in the lower reaches of Tarim River. *Ecology and Environment*, 16, 1219–1224. (in Chinese with English abstract) [张绘芳, 李霞, 王建国, 杨艳静 (2007). 塔里木河下游植物群落结构特征分析. 生态环境, 16, 1219–1224.]
- Zhang X, Liu XC, Xiao JD, Yang ZH (2005). Study on the EOS/MODIS image processing and its application in monitoring the vegetation change in the lower reaches of the Tarim River. *Arid Zone Research*, 22, 532–536. (in Chinese with English abstract) [张旭, 刘新春, 肖继东, 杨志华 (2005). EOS/MODIS影像处理在塔里木河下游植被监测中的应用. 干旱区研究, 22, 532–536.]
- Zhang YM, Chen YN, Pan BR (2005). Distribution and floristics of desert plant communities in the lower reaches of Tarim River, southern Xinjiang, People's Republic of China. *Journal of Arid Environments*, 63, 772–784.
- Zhao YS (2003). *Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application*. Science Press, Beijing. 204–208. (in Chinese) [赵英时 (2003). 遥感应用分析原理与方法. 科学出版社, 北京. 204–208.]
- Zhu JT, Yu JJ, Wang P, Wang ZY (2011). Quantitative classification and analysis of relationships between plant communities and their groundwater environment in the Ejina Desert Oasis of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 480–489. (in Chinese with English abstract) [朱军涛, 于静洁, 王平, 王志勇 (2011). 额济纳荒漠绿洲植物群落数量分类及其与地下水环境的关系分析. 植物生态学报, 35, 480–489.]
- Zhu JT, Yu JJ, Wang P, Yu Q, Eamus D (2013). Distribution patterns of groundwater-dependent vegetation species diversity and their relationship to groundwater attributes in northwestern China. *Ecohydrology*, 6, 191–200.
- Zhu XC, Yuan GF, Yi XB, Du T (2014). Leaf area index inversion of riparian forest in the lower basin of Tarim River based on Landsat 8 OLI images. *Arid Land Geography*, 37, 1248–1256. (in Chinese with English abstract) [朱绪超, 袁国富, 易小波, 杜涛 (2014). 基于Landsat 8 OLI影像的塔里木河下游河岸林叶面积指数反演. 干旱区地理, 37, 1248–1256.]

责任编辑: 康慕谊 责任编辑: 王 葳