

文章编号: 1007-4619(2002)04-0299-08

绿洲-荒漠交错带地下水位分布的遥感模型研究

塔西甫拉提·特依拜¹, 阿布都瓦斯提·吾拉木^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘 要: 以利用卫星遥感数据评价干旱区绿洲-荒漠交错带地下水位的分布作为主要研究目的, 使用全波段 Landsat-7 ETM+ 图像, 用遥感-数学-模型学融合的研究方法, 在实地考察地下水位、土壤水分和其他辅助资料的基础上, 建立土壤水分和地下水位的实验方程, 提出了评价地下水位分布的遥感模型——GLDRS 模型。利用 GLDRS 模型对新疆策勒绿洲-荒漠交错带进行了实地验证, 结果表明, 研究结果符合实际, GLDRS 多波段模型优越单波段模型, 理论地下水位和实测地下水位之间的相关系数为 0.901。

关键词: 绿洲-荒漠交错带, 遥感图像处理, 地下水位, GLDRS 模型

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

地下水是非常重要的自然资源之一, 地下水位的年、季变化将引起灌溉、饮水和种植结构的变化。因此, 合理、协调地开发和利用地下水, 找出地下水位监测的省钱、省力的科学方法, 对干旱、半干旱地区的生态平衡、经济建设和进行农业可持续发展至关重要。遥感具有宏观、综合、动态、快速特点为地下水资源调查和监测提供了新的探测手段。

遥感技术应用于地下水资源的勘探评价可追溯到 1961 年^[1], 已经有 40 年的历史。最初科学家们主要用热红外航空相片, 通过提取地面温度信息, 利用简单的水循环模型, 参照地形和指示植被初步判断地下水富集带和地下水补给来源^[2]。70 年代以来, 随着地球资源卫星的成功发射卫星遥感数据广泛应用于与地下水资源密切相关的地质条件的解译分析和植被、温度信息的提取, 取得了有效的成果。国内外有些学者遥感图像中提取地层岩性、构造、水文等水文地质信息, 确定了有利的蓄水构造, 判断含水层发育规律及各种边界类型, 结合物探结果, 对地下水资源进行了较准确地评价^[3-7]; S.W.Finch, 王飞跃等人从研究植被、水系、温度等因素地下水的依

存、制约关系, 推断出了地下水富集带^[8-9]。90 年代后期, 对于地下水资源的评价研究发展到 RS, GIS, GPS 一体化应用研究方向。通过多源遥感资料与水文、地质和物探资料的拟合, 建立由地质、地貌、水文因素线形特征图、土地利用图, DEM 和实测数据构成的地理信息系统, 推断浅层地下水富水区, 大致评价了地下水位^[10-14]; S.A.Komarov 等人^[15]利用雷达图像在土壤介电常数和土壤对雷达波段的反射特性, 提出了在地下水位 3m 以上的高水位区测定地下水位的方法。

策勒绿洲-荒漠交错带位于山前洪积扇群带, 降水量极小, 没有灌溉。地下潜流流至洪积扇缘以下的细土平原地带时, 由于整个地势的降低及地下含水层透水性的减弱, 地下水位抬高到 2—7m, 通过岩石和土壤的毛细管作用和热传导作用以及地表强烈的蒸发作用, 引起地表土壤湿度和温度的变化。本文在确定策勒绿洲-荒漠交错带的范围有关研究的基础上, 把策勒县绿洲-荒漠交错带选择为重点靶区, 综合考虑植被、土壤理化性质、水文资料, 使用 Landsat-7 ETM+ 图像 2, 3, 4 波段, 用遥感-数学-模型学融合的研究方法, 引入并调整土壤水分遥感监测模型, 在实地考察的地下水位、土壤水分和其他辅助资料的基础上, 建立土壤水分和地下水位的实验方

收稿日期: 2001-06-12; 修订日期: 2001-12-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973 项目), 中国西部干旱区生态环境演变与调控研究第八课题: 西部干旱区生态环境调控与管理研究的资助(1999043508) 及国家自然科学基金项目“塔里木盆地南缘绿洲-荒漠交错带环境演变遥感研究”(49861005)。

作者简介: 塔西甫拉提·特依拜(1958—), 男, 维吾尔族, 毕业于日本东京理工大学遥感专业, 教授(工学博士), 现从事遥感技术及应用研究, 发表论文 60 余篇, 出版专著 2 部。

程,提出了评价地下水位分布的遥感监测模型(Model of Groundwater Level Distribution Using Remote Sensing, 以下简称为 GLDRS 模型)。

2 土壤水分遥感监测模型的引入并调整

2.1 土壤水分遥感监测单时相单波段 ETM+数据模型

土壤光谱受土壤母质、有机质、水分等多种复杂因素的影响,在母质等其余因素固定的条件下,土壤光谱受土壤水分的制约比较明显。研究表明土壤水分含量的增加而反射率呈指数下降趋势,其公式为^[16]:

$$R = ae^{bW} \quad (1)$$

R 为光谱反射率; W 为土壤水分百分数; a, b 为待定系数。

卫星传感器接受到土壤某波长的光谱辐射亮 B_n 可表示为^[16]:

$$R_n = AB_n - b \quad (2)$$

其中, R_n 为入射到土壤平均辐射亮度; B_n 为卫星遥感数据相应波段的平均光谱亮度; A, b 与卫星波段和土壤类型的不同稍微有差别,利用公式(2)由第 4 波段样本数据进行回归分析,建立回归方程,确定了 A, b 分别为 0.9960, 42.05。这说明土壤某波段平均光谱反射率与卫星遥感数据相应波段的光谱亮度成正比,通过这一公式可以把卫星数据转换成土壤反射率数据。

对公式(1)两边同时取自然对数,进行对数基变换,然后和公式(2)合并,可得:

$$W_i = 91.70 - 42.911g(0.996B_i - 42.05) \quad (3)$$

i 为 Landsat-7 ETM+的波段号; W_i 表示用 ETM+ 波段来求出的土壤含水百分率。

随着土壤类型的不同,公式(3)中的常数有差别,基于研究区实测数据的统计分析和回归分析,用已知数据进行调试,并且避免对数号内出现负值,将(3)式进行截距修正,变为:

$$W_i = 65.0 - 42.911g(0.996B_i - 42.05) \quad (4)$$

卫星遥感图像记载了地物对电磁波的反射信息,以及地物自身的热辐射信息。地面物由于其结构、组成及理化性质的差异,从而导致不同的地物对电磁波的反射存在着差异,以及其热辐射也不完全相同。对于水体来说,水体几乎全部吸收了近红外

和中红外波段(Landsat-7 ETM+第 5 和第 7 波段)内的入射能量,所以水体在近红外和中红外波段内的反射能量很少,而植被、土壤在这两个波段内的吸收能量较小,而且有较高的反射特性,在第 3 波段植被的反射率较低,而裸土和水体的反射率较高。因此,本文认为在忽略植被对土壤水分遥感影响的情况下,公式(4)可作为土壤水分遥感监测 ETM+3, 5, 7 波段数据模型。

2.2 土壤水分遥感监测单时相多波段 ETM+数据模型

绿洲-荒漠交错带植物总覆盖率为 20%—30%, ETM+图像的反射率由植被和土壤两部分反射率组成,准确、高精度地估测土壤水分,必须以单纯土壤反射率作为根据,排除植被反射率值。为此,本文考虑到排除植被对土壤水分遥感干扰,引入了“光学植被盖度”的估算模型。

“光学植被盖度”被定义为实有植被的光学信息量占观测范围内全部为植被光学信息量的比。对于陆地卫星 ETM+数据一个像元的光学植被盖度可由 2, 3, 4 波段的光谱亮度来估算,其公式如下^[16]:

$$C_{vo} = 0.00579B_4 - 0.00308B_2 - 0.002482B_3 - 0.08905 \quad (5)$$

式中 C_{vo} 为像元的光学植被盖度; B_4, B_2, B_3 分别为 ETM+4, 2, 和 3 波段的光谱亮度。

对于包含土壤和植被两种地物信息的某个像元,其光谱亮度是两种地物辐射亮度的复合。为排除植被对土壤水分的干扰,使带有植被光谱信息的复合像元变成裸土光谱亮度。以 4 波段为例,其换算公式为^[16]:

$$B_{4\pm} = \frac{0.6996B_2 + 0.5249B_3 - 0.2246B_4 + 18.83}{1.089 - 0.00579B_4 + 0.003308B_2 + 0.002482B_3} \quad (6)$$

对于陆地卫星 4 波段,把公式(2)可改写为:

$$R_{4\pm} = 0.9960B_{4\pm} - 42.05 \quad (7)$$

$R_{4\pm}$ 为土壤在 4 波段的平均反射率。

由公式(6)和(7)合并可得:

$$R_{4\pm} = \frac{0.6968B_2 + 0.5228B_3 - 0.2237B_4 + 18.76}{1.089 - 0.00579B_4 + 0.003308B_2 + 0.002482B_3} - 42.05 \quad (8)$$

将公式(8)代入公式(4)

$$W_4 = 65.0 - 42.911g\left[\frac{0.6968B_2 + 0.5228B_3 - 0.2237B_4 + 18.76}{1.089 - 0.00579B_4 + 0.003308B_2 + 0.002482B_3} - 18.0\right] \quad (9)$$

通过此模型,利用某像元 2,3,4 波段的光谱亮度值可以测定该像元的土壤水分。

$$A = W_0^2, B = \frac{W_{\max}^2 - W_0^2}{H} \quad (12)$$

3 地下水位遥感监测模型的建立

绿洲-荒漠交错带由于没有人工灌溉,降水量极少,蒸发量大,土壤含水量受地下水埋深影响极大。当潜水位高时,表层土壤可得到毛细管水的补给,使其保持较高的土壤含水量,随着潜水位的下降,土壤含水量随毛细管水的补给减少而下降,以至土壤的有效含水量不能满足植物的需要而形成土壤干旱。由此可见,地下水通过毛细管作用和热传导作用,引起地表湿度的变化,土壤水分是地下水位高低的直接反映。下面用土壤水分遥感监测,提出测定地下水位的遥感模型——地下水位-土壤水分模型。

地下水位遥感监测的物理基础是:在地下水位以上的土层中土壤存在毛细管,地下水通过毛细管作用能够达到地面。地下水位的高低能够反映浅层土壤水分含量以及土壤的反射、散射性质。

假设, y 为从地面往下的垂直坐标轴,并 $y=0$ 为土壤-大气接触面。水分在毛细管中的分配可以用下式来描述^[15]:

$$W^2(y) = A + By, \max(0, H - H_m) \leq y \leq H_m \quad (10)$$

式中: H 为地下水埋深深度, H_m 为从地下水-土壤接触面地下水能上升到毛细管的高度。

H_m 和土壤的理化性质有关,同样土壤类型具有同样的 H_m 值,土壤类型不同,地下水能上升到毛细管的高度也不一样。常数 A 和 B 由下面的 3 种边界条件来定义:①在土壤-地下水接触面, $y = H$, 土壤水分为最大值 W_{\max} ;②在地下水能上升到毛细管的高度处, $y = H - H_m$, 土壤水分为最小值 W_{\min} ;③在土壤-大气接触面, $y = 0$, 土壤水分为 W_0 。通过把①和②边界条件运用到(10)式可得:

$$A = W_{\max}^2 - (W_{\max}^2 - W_{\min}^2) \frac{H}{H_m}, B = \frac{W_{\max}^2 - W_{\min}^2}{H_m} \quad (11)$$

若条件②被③代替:

$$H_i = d + H_m \frac{W_{\max}^2 - [65.0 - 42.91 \lg(0.996 B_i - 42.05)]^2}{W_{\max}^2 - W_{\min}^2} \quad (14)$$

$$H_i = d + 2(H_m) \frac{W_{\max}^2 - \left[65.0 - 42.91 \lg \left[\frac{0.6968 B_2 + 0.5228 B_3 - 0.2237 B_4 + 20.26}{1.089 - 0.00579 B_4 + 0.003308 B_2 + 0.002482 B_3} - 18 \right] \right]^2}{W_{\max}^2 - W_{\min}^2} \quad (15)$$

研究区域年均降水量约为 30—50mm, 年均蒸发量却高达 2400mm, 土壤为固定、半固定沙丘上发育的风沙土, 地表土壤水分 $W_0=0$, 所以地下水位和地表土壤水分之间基本上没有相关关系, 而在此不必考虑(12)式。

在常数 W_{\max} , W_{\min} 和 H_m 已知, 并遥感监测土壤水分的有效深度被测定的条件下, 公式(10)为遥感监测地下水位提供了基础条件。不过, 由于遥感监测土壤水分有效深度只限于近地表很浅的土层, 对于 Landsat-7 卫星来说, 监测土壤水分的有效深度为 0.10m^[16], 而浅层土壤水分和地下水位之间的相关关系不太稳定, 准确地反映地下水位不是那么简单的事情。下面从 3 种条件分析不同深度土壤水分和相应地下水位的关系。

(1) 地下水溢出地表的情况 ($H \ll H_m$) 由于地下水上升到地表浅层, 浅层土壤水分等于最大土壤水分 W_{\max} , 传感器只能记录潮湿的地表反射或散射的电磁波, 这样, 遥感监测到的是有地下水溢出的地表。

(2) 毛细管条件 ($H < H_m$) 地下水位比第一种情况的地下水位低, 但毛细管作用的表现使土壤浅层土壤水分的遥测成为了可能。

(3) 地下水位很低的情况 ($H > H_m$), 因为地下水位很低, 地下水不能通过毛细管作用达到地面, 无法实现地下水位的遥测。

由此可知, 在第一种情况, 地下水溢出地表, 浅层土壤过度潮湿, 形成沼泽地, 地下水在遥感图像中的表现多为水体。之所以第二种情况很有研究意义, 是因为地下水没有溢出地表, 埋深深度比较理想。

若用 d 来表示监测土壤水分的有效深度, 并 $y = d$, 用 W_d 来表示 d 深处土壤水分, 式(11)代入式(10)可以得到土壤水分-地下水位关系方程, 即:

$$H = d + H_m \frac{W_{\max}^2 - W_d^2}{W_{\max}^2 - W_{\min}^2} \quad (13)$$

利用公式(4), (9)和(13)可得以下地下水位遥感监测的单波段和多波段模型:

H_i 和 H_{234} 是分别用 ETM+ 单波段和多波段模型求算的地下水位。

如果水文常数 W_{\max} , W_{\min} 和 H_m 已知, 并遥感监测土壤水分的有效深度 d 被确定, 利用某像元的光谱亮度值, 可以定量测定地下水位。

4 模型参数测定及理论地下水位验证

2000 年 9 月 13 日至 20 日, 研究人员在新疆策勒县绿洲-荒漠交错带进行了实地考察, 选择 30 个样点(图版 I) 实测了以下数据: 植被盖度、枝叶郁闭度, 土壤表面含水量、表层 0.10m、0.50m 土壤含水量、地下水位。其目的是调整土壤水分遥感监测模型以便符合研究区的土壤类型, 建立定量评价地下水位的经验公式; 验证地下水位遥感定量监测模型。

4.1 模型部分参数的测定

d : Landsat-7 ETM+ 图像监测土壤水分的有效深度 $d=0.1\text{m}$ ^[16];

W_{\max} : 由于在地下水和土壤接触面土壤水分为

$$H_i = 0.1 + 6.3 \times \frac{1225 - [65.0 - 42.91 \lg(0.996 B_i - 42.05)]^2}{1214.2} \quad (16)$$

$$H_{234} = 0.1 + 6.3 \times \frac{1225 - \left[65.0 - 42.91 \lg \left(\frac{0.6968 B_2 + 0.5228 B_3 - 0.2237 B_4 + 20.26}{1.089 - 0.00579 B_4 + 0.003308 B_2 + 0.002482 B_3} - 18.0 \right) \right]^2}{1214.2} \quad (17)$$

4.2 理论地下水位的验证

本文采用的数据来源于 Landsat-7 ETM+ 8 个波段图像, 成像日期为 1999-09-13。1999 年 9 月没有实地检测地下水位, 只有 2000-09-13 至 09-20 进行了实地考察。考察期间研究区天气情况没有变化, 一直晴朗, 无雨无大风, 因此建立模型时, 没有考虑降雨和风速对土壤水分的影响。为了查明理论地下水位和实测地下水位的相关性, 首先要确定能否利用 2000 年实测的地下水位来验证 1999 年研究区理论地下水位。为此, 我们从前对地下水位的年内和年际变化进行了研究, 研究结果表明绿洲-荒漠交错带地下水位年内变化大, 而年际变化稳定, 在同一个季节地下水位的年际变化结果几乎是相同的^[17]。因此, 本文认为 1999 年秋季地下水位和 2000 年秋季地下水位之间变化可略, 根据 2000 年野外实测数据可以评价利用 1999 图像监测出来的理论地下水位和 1999

最大, 在研究区共选择 10 个样点测定了最大土壤水分, 平均为 35.18%; 室内烘干 1000 克土样, 然后逐渐增加水, 使其饱和, 增加的水量就是最大土壤水分。通过这种方法测定的最大土壤水分 34.82%, 取室内和野外实测值的平均值 $W_{\max} = 35\%$;

W_{\min} : 绿洲-荒漠交错带从地面到地表 0.08—0.10m 深处土壤水分几乎为零, 这说明地下水只能达到此深处或地表蒸发量高。根据 W_{\min} 的定义有效最小土壤水分是对 0.10m 深处的土壤水分实测数据进行统计分析算出来的, $W_{\min} = 3.28\%$;

H_m : H_m 是指地下水通过毛细管能够上升的高度, 它跟土壤质地、结构和理化性质有关, 同一类土壤有相等的 H_m 值。由于条件的限制我们采用下面的两种方法确定了 $H_m = 6.3\text{m}$;

①在研究区选择 10 个比较典型的样点, 根据野外实测的地下水位和从地表到地下水上升到的土层厚度 x , 利用公式 $H_m = H - x$ 估测, 取其平均值。

②用 30 实地考察点进行统计分析, 利用公式 (13) 找出方差最小、最好地反映实测地下水位的 H_m 。

带入以上的参数值把公式 (14), (15) 可以改写为

年实际地下水位的符合度。

5 应用实例及讨论

5.1 计算结果

Landsat-7 ETM+ 图像分辨率很高, 可以找到地面某一个点在图像上的位置, 并计算其地下水位。由 20 个样点实测地下水位和理论地下水位可见(表 1, 表 2 和图 1—图 4); GLDRS 模型中多波段模型优于单波段模型, 比单波段模型更好地反映地下水位, 虽然单波段模型的相关性也比较好, 但是实测和图像监测数据的差值大。由此本文肯定 GLDRS 多波段模型, 并认为当评价地下水位分布时, 应考虑研究区植被覆盖率的影响。以下表和图 2 为 2000 年 9 月实测的部分参考点地下水位及该点理论地下水位的监测值。

H_3, H_5, H_7 分别是用 Landsat-7 ETM+ 图像 3, 5, 7 波段数据获得的地下水位。

表 1 利用 Landsat-7 ETM+ 单波段模型求算的地下水位

Table 1 Model computations of groundwater level using landsat-7 ETM+ mono-band model

序号	经纬度	2000 年实测地下水位 H/m	1999 年图像亮度值			1999 年图像地下水位监测值/ m		
			B_3	B_5	B_7	H_3	H_5	H_7
1	N37°5.787', E80°48.718'	3.05	164	172	158	3.38	3.07	3.61
2	N37°01.208', E80°53.792'	3.60	134	146	122	4.57	4.09	5.06
3	N37°00.983', E80°53.798'	3.50	137	167	132	4.45	3.26	4.65
4	N37°01.317', E80°53.712'	3.30	156	163	157	3.69	3.42	3.65
5	N37°04.923', E80°45.988'	3.10	180	185	182	2.77	2.58	2.69
6	N37°04.760', E80°45.222'	3.30	172	184	178	3.07	2.62	2.84
7	N37°01.779', E80°56.379'	3.40	133	149	127	4.61	3.97	4.85
8	N37°01.467', E80°57.074'	4.30	87	111	78	6.29	5.49	6.45
9	N37°02.218', E80°55.317'	2.20	166	177	165	3.30	2.88	3.34
10	N37°01.965', E80°55.045'	3.10	165	170	163	3.34	3.15	3.42
11	N37°04.810', E80°49.042'	3.15	148	164	154	4.01	3.38	3.77
12	N37°05.115', E80°49.036'	3.20	147	160	154	4.05	3.54	4.17
13	N37°01.685', E80°53.480'	3.50	139	153	136	4.37	3.81	4.49
14	N37°02.430', E80°53.808'	3.00	171	179	169	3.11	2.81	3.19
15	N37°02.103', E80°54.361'	3.30	152	164	150	3.85	3.38	3.93
16	N37°01.497', E80°54.203'	3.30	147	162	144	4.05	3.46	4.17
17	N37°00.453', E80°53.371'	3.50	126	146	125	4.81	4.09	4.93
18	N37°00.816', E80°53.772'	3.50	142	163	133	4.25	3.42	4.61
19	N36°58.825', E81°06.095'	5.10	106	118	87	5.68	5.21	6.29
20	N36°59.747', E81°06.855'	3.70	141	141	139	4.29	4.29	4.37
实测地下水位和监测数据的相关系数						0.803	0.929	0.816

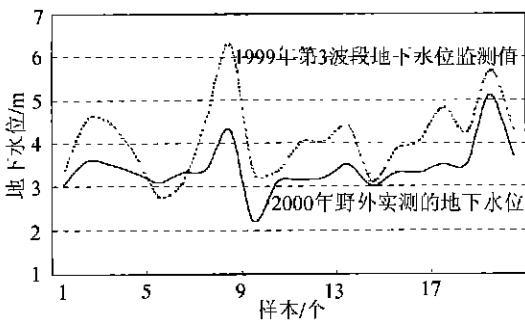


图 1 野外实测数据和图像第 3 波段监测数据曲线图
Fig. 1 Graph of field measured data and computed data from band 3

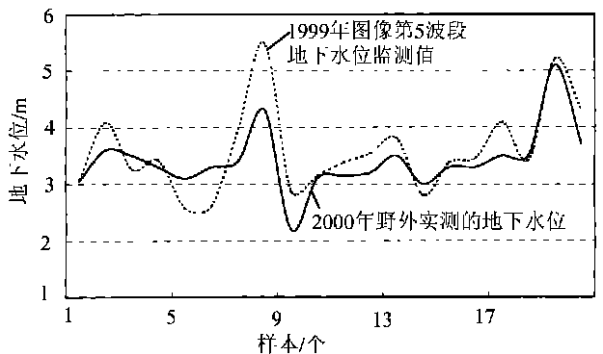


图 2 野外实测数据和图像第 5 波段监测数据曲线图
Fig. 2 Graph of field measured data and computed data from band 5

表 2 利用 Landsat-7 ETM+ 图像多波段模型求算的地下水位

Table 2 Computations of groundwater level using landsat-7 ETM+ multi-band model

序号	经纬度	2000 年实测地 下水位 H/m	1999 年图像亮度值			1999 年图像地下水位 监测值/m
			B_2	B_3	B_4	H_{234}
1	N37°5.787', E80°48.718'	3.05	132	164	138	3.06
2	N37°01.208', E80°53.792'	3.60	114	134	135	3.45
3	N37°00.983', E80°53.798'	3.50	117	137	130	3.51
4	N37°01.317', E80°53.712'	3.30	126	156	134	3.23
5	N37°04.923', E80°45.988'	3.10	142	180	141	2.85
6	N37°04.760', E80°45.222'	3.30	140	172	141	2.90
7	N37°01.779', E80°56.379'	3.40	115	133	138	3.38
8	N37°01.467', E80°57.074'	4.30	84	87	133	4.29
9	N37°02.218', E80°55.317'	2.20	134	166	140	2.99
10	N37°01.965', E80°55.045'	3.10	132	165	137	3.07
11	N37°04.810', E80°49.042'	3.15	124	148	141	3.14
12	N37°05.115', E80°49.036'	3.20	120	147	140	3.20
13	N37°01.685', E80°53.480'	3.50	115	139	131	3.49
14	N37°02.430', E80°53.808'	3.00	136	171	138	2.99
15	N37°02.103', E80°54.316'	3.30	124	152	135	3.25
16	N37°01.487', E80°54.203'	3.30	121	147	137	3.26
17	N37°00.453', E80°53.371'	3.50	109	126	138	3.48
18	N37°00.816', E80°53.772'	3.50	116	142	136	3.38
19	N37°58.825', E81°06.095'	5.10	91	106	110	4.43
20	N37°59.747', E81°06.855'	3.70	117	141	127	3.54

实测地下水位和监测数据的相关系数

0.901

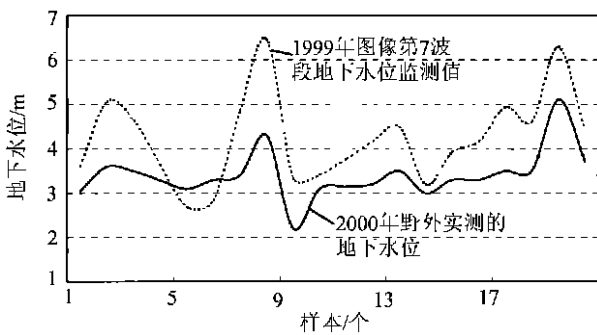


图 3 野外实测数据和图像第 7 波段监测数据曲线图

Fig. 3 Graph of field measured data and computed

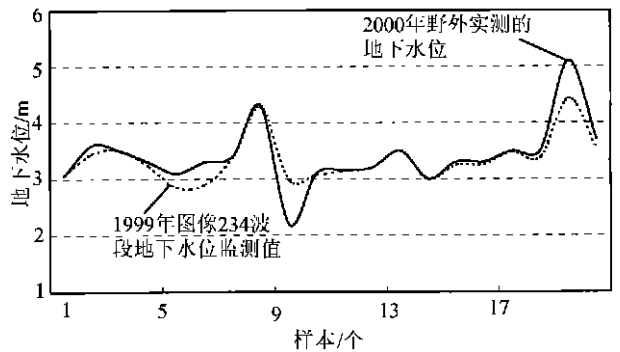


图 4 野外实测地下水位和多波段

模型监测地下水位曲线图

Fig. 4 Graph of field measured ground water level and

computed ground water level by multi-band model

5.2 遥感图像的处理及地下水位专题图的生成

所使用的遥感数据为 1999-09-13 记录的 Landsat-7 ETM+8 个波段图像,图幅范围 6967×5965 像元。由于实际研究的需要,在对图像作了辐射校正和几何精校正之后,从中确定并截取覆盖实验区的、大小为 900×1200 像元的子影响,然后进行了分类,分类算法采用基于光谱信息的最大似然比监督分类算法。利用加拿大 PCI 遥感图像处理软件包,对研究区各土地覆盖类型分布进行分析(图版 I 图 5)。所确定的分类系统为:

I—绿洲, II—荒漠, III—交错带, IV—水体。

由于研究重点在于绿洲-荒漠交错带,为了突出绿洲-荒漠交错带的信息,其他非交错带像元经编程处理后光谱信息设置为零(图版 I 图 6)。在图像上选择分布均匀的 52 个点,根据每个像元 2、3、4 波段的光谱亮度值,利用 GLDRS 多波段模型计算其地下水位,然后按地下水位的高低对图像进行分类,制作地下水位分布图(图版 I 图 7)。

6 结 论

本文采用遥感-数学-模型学融合的研究方法,从遥感在水利方面的应用角度出发,提出了在绿洲-荒漠交错带特定的自然环境有效探测地下水资源的 Landsat-7 ETM+ 遥感图像模型。认为在干旱、半干旱地区,尤其在地下水埋深深度不大于 7m 的自然带,利用 GLDRS 多波段模型监测并评价地下水位分布是可行的。

在第 3、7 波段,植被的反射率最低,在第 5、7 波段水体的反射率最低,但是单波段模型的监测值说明,不管对第 3 波段还是对第 5、7 波段,植被对反射率的影响不可忽略,为了准确地监测地下水位必须排除植被对反射率的干扰。

通过引入光学植被盖度的概念可以有效地排除植被对反射率的影响,把像元反射率转换成纯土壤反射率。这使经土壤水分的遥感建立有效监测地下水位遥感模型具备了前提条件。

用 GLDRS 多波段模型,把图像转换成地下水位的分布图,分出 3 类: $2\text{m} \leq H \leq 3\text{m}$ (图版 I 图 7 上的绿色区), $3\text{m} \leq H \leq 4\text{m}$ (图版 I 图 7 上的蓝色区), $4\text{m} \leq H \leq 5\text{m}$ (图版 I 图 7 上的红色区)。从模型监测的地下水位分布情况看,研究结果符合实际。

需要进一步深入研究的问题

(1) 反映地下水位的因素除了土壤水分以外还有植被类型、植被覆盖度、土壤温度。这 3 种因素随地下水位的高低而变化。经分解像元,识别植被类型,用 NDVI 评价植被盖度,然后充分利用这些因素,建立地下水位遥感监测的植被类型、植被覆盖度、土壤温度模型更有研究价值和意义。

(2) 国内外研究表明 Landsat-7 ETM+ 第 5、7 波段对水体最敏感,第 5、7 波段某像元中分出植被的反射率,然后用单波段模型监测地下水位值得继续研究。用第 5、7 波段某像元中可以得出植被对反射率的贡献的方法:在研究区测定不同植被覆盖条件下的土壤反射率和裸土反射率,找出相差,建立分解模型。

参 考 文 献 (References)

- [1] J M Whiting. Airborne Thermal Infra-red Sensing of Soil Moisture and Groundwater [A]. Canadian Aeronautics and Space Institute. Remote Sensing of Soil Moisture and Groundwater [C]. Canada, 1976.
- [2] J D Mollard. Integration of Remote Sensing Techniques Applied to Groundwater Investigation [A]. Canadian Aeronautics and Space Institute. Remote Sensing of Soil Moisture and Groundwater [C]. Canada, 1976.
- [3] A A Omar. Use of SIR-A Interpretation for under Ground Water Prospecting in Southern Iraq [A]. The Institute of Mining and Metallurgy. Remote Sensing: An Operational Technology for the Mining and Petroleum Industries [C] London, 1990.
- [4] Debasish Das. Extraction of Geomorphic and Geologic Information for Groundwater Exploration Through Satellite Remote Sensing in and Around the Wichita Mountains Oklahoma [A]. Proceedings of Environmental Research Institute of Michigan Proceedings of Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing [C]. Denver Colorado, USA, 1991.
- [5] K R Knapp, K M Morgan. Using SPOT and TM to Map Fractures Related to Ground-Water Resources San Antonio, Texas, USA 1994. in the Slick Hills of Oklahoma [A]. Environmental Research Institute of Michigan Proceedings of Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing [C].
- [6] J Krishnamurthy, G Srinivas. Role of Geological and Geomorphological Factors in Ground Water Exploration: A Study Using IRS LISS Data [J]. *Int. Journal of Remote Sensing*, 1995, 16 (14): 2595—2618.
- [7] Li Tingqi, Zhang Yibin. Remote Sensing Geological Study of Water Resources in Tarim Basin [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1998, (4): 11—19. [李延祺, 张义彬. 塔里木盆地水资源的遥感地质研究[J]. 国土资源遥感, 1998, (4): 11—19.]
- [8] J W Finch. Location of High Yielding Groundwater Sites in Zimbabwe Using of Remote Sensed data [A]. Remote Sensing: An Operational Technology for the Mining and Petroleum Industries [C]. 1990.
- [9] Wang Feiyue, Sun Shunxin. The Application of Environmental Remote

- Sensing Information Analysis in Seeking for Water Resource in Arid Areas seeking for Water [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1999, (1); 36-42 [王飞跃, 孙顺新, 环境遥感信息分析法在干旱区找水中的应用——以内蒙锡林浩特地区为例[J]. 国土资源遥感, 1999, (1); 36-42.]
- [10] Timothy B Minor, Jerome A Carter, Matthew M Chestey, et al. The Use of GIS and Remote Sensing in Groundwater Exploration for Developing Countries [A]. Environmental Research Institute of Michigan. Proceedings of Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing [C]. San Antonio, Texas, USA, 1994
- [11] Krishnamurthy, N Venkatesa Kumar, V Jayaraman, et al. An Approach to Demarcate Ground Water Potential Zones Through Remote Sensing and Geographical Information System [J]. *Int. Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(10); 1867-1884.
- [12] A K Saraf, P R Choudhury. Integrated Remote Sensing and GIS for Groundwater Exploration and Identification of Artificial Recharge Sites [J]. *Int. Journal of Remote Sensing*, 1988, 19(10); 1825-1841.
- [13] K S R Murthy. Groundwater Potential in a Semi-arid region of Andhra Pradesh——A Geographical Information System Approach [J]. *Int. Journal of Remote Sensing*. 2000, 21(9); 1867-1884.
- [14] S Shahid, S K Nath, J Roy. Groundwater Potential Modeling in a Soft Rock Area Using GIS [J]. *Int. Journal of Remote Sensing*. 2001, 21(9); 1919-1924.
- [15] S A Komarov, V L Mironov, A N Romanov, et al. Remote Sensing of Water Table: Measurement and Data Processing Algorithm [J]. *Mapping Science and Remote Sensing*, 1999, 36(1); 1-10.
- [16] Liu Peijun, Zhang Lin, Alishir Kurban, et al. A Method for Monitoring Soil Water Contents Using Satellite Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2); 135-138 [刘培君, 张琳, 艾里西尔库尔班等. 卫星遥感估测土壤水分的一种方法[J]. 遥感学报, 1997, 1(2); 135-138.]
- [17] Tashpolat Tiyip. The Study on Arid Land Environmental Change and Application of Remote Sensing [M]. Urumqi: Xinjiang University Press, 2001. [塔西甫拉提·特依拜等. 干旱区环境演变与遥感应用研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 2001.]

Research on Model of Groundwater Level Distribution in the Oasis and Desert Ecotone Using Remote Sensing

TASHPOLAT Tiyip¹, ABDUWASIT Ghulam^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Institute of Remote Sensing and Geographical Information System, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The purpose of this study is to determine the depth of occurrence of groundwater and to evaluate the groundwater level distribution in the oasis and desert ecotone. In this research, on the basis of the regression analysis of groundwater levels and soil water content data measured in the field, a model of groundwater level distribution using remote sensing (GLDRS) was established using Landsat-7 ETM⁺ image, by dint of practical work and field data examination. To obtain water content of soil precisely using Landsat-7 ETM⁺ image, which is related to the remote measurement of groundwater level, the concept and model of optical vegetation cover is led in.

The results of the experimental teste of the GLDRS model in the oasis and desert ecotone of Qira county, Xinjiang Uyghur Autonomous Region are discussed. A good correspondence (correlation coefficient is 0.901) was obtained between the groundwater level at control points, where direct measurements were made, and those derived from Landsat-7 ETM⁺ data. Groundwater level distribution in the whole ecotone was evaluated and presented in the form of thematic maps.

Key words: oasis and desert ecotone; processing of remote sensing image; groundwater level; GLDRS model

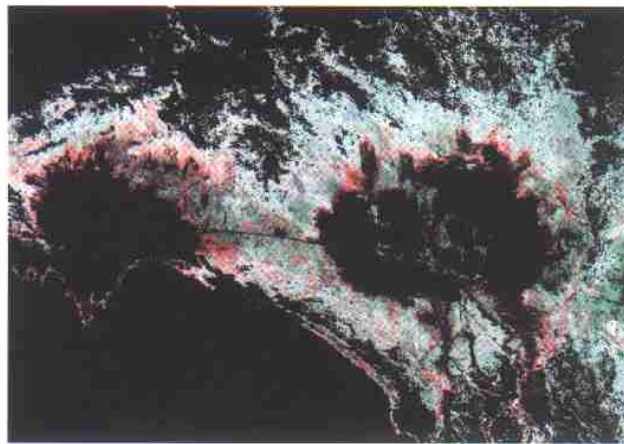
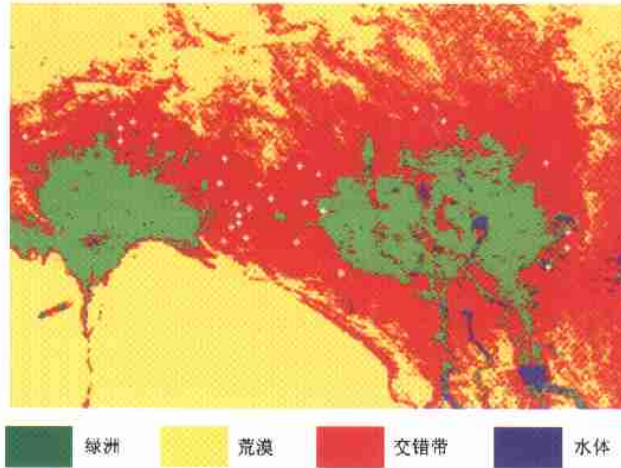


图6 编程突出的绿洲-荒漠交错带假彩色合成图

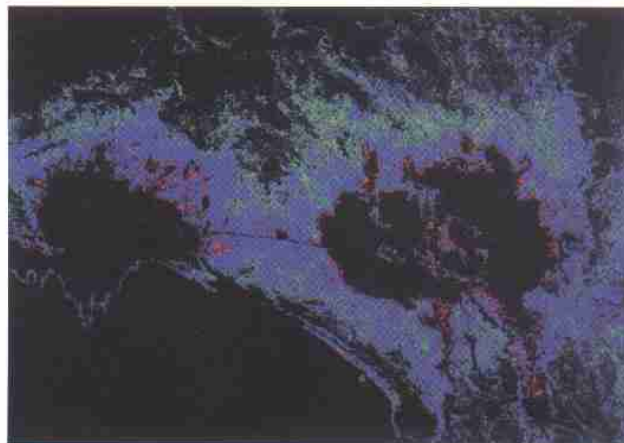


图7 绿洲-荒漠交错带地下水位分布图