

干旱区绿洲地下水水位时空变异性 对土地覆被变化的响应

闫金凤^{①②} 陈曦^① 罗格平^① 郭全军^③

(^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 100039; ^③ 兵团一建水文地质基础工程公司, 乌鲁木齐 830009. E-mail: yanjf2004@163.com)

摘要 应用遥感、地理信息系统和地统计学方法, 分析三工河流域绿洲土地利用/土地覆被变化对地下水水位时空变异性的影响。通过半变异函数模型、克里格插值拟合三工河流域 1978, 1987 和 1998 年地下水水位时空变异性特征, 结合遥感解译生成的 1978, 1987 和 1998 年三期土地利用/土地覆被类型分类图, 叠加分析不同地下水埋深等值线区域土地利用/土地覆被类型转移关系。结果表明 1978~1998 年 20 年间无论是平水期还是丰水期, 整个绿洲地下水补给量变幅并不显著, 而地下水位和土地利用/土地覆被均发生了显著的时空变化, 并且两者之间具有密切的相关性。流域地下水水位整体具有中等的空间相关性(33.4%), 空间自相关距离为 17.78 km。地下水位急剧变化的区域均是土地资源开发加剧的区域, 主要表现为耕地、林地、建设及工矿用地土地资源的开发。研究反映出干旱区绿洲土地利用/土地覆被变化对地下水资源时空变异性产生了深远的影响, 这对于合理利用浅层地下水资源, 维护绿洲的稳定性具有直接的现实意义。

关键词 土地利用/土地覆被 地下水位 半变异函数 克里格插值 三工河流域

干旱区绿洲对水资源具有极强的依赖性^[1-4]。在长期水土资源开发利用过程中, 水资源不平衡常常是水土开发的主要矛盾^[5-7], 其中地下水过渡开采引起的地下水位下降和地下水水质恶化是水资源利用中突出的问题^[8-11], 在干旱区绿洲尤为显著。随之还会引起一系列生态与环境问题, 如植被退化^[12-14]、土地荒漠化^[15]等。很多学者对地下水利用出现的环境问题进行了研究, 但多处定性研究阶段, 对产生这些问题的驱动力进行系统性的深入研究较少^[16,17], 如干旱区人为驱动的土地利用与土地覆被变化(LUCC)如何引起地下水位变化的过程及其结果的定量研究还比较缺乏^[18,19]。本文以新疆天山北麓三工河流域绿洲为研究区域, 应用遥感、地理信息系统和地统计分析的方法, 探讨干旱区绿洲地下水水位时空变异性、土地利用与土地覆被时空变化以及两者之间的作用过程及其内在联系, 以揭示不断加剧的人类活动对绿洲水环境产生的影响。研究结果对实现干旱区绿洲的可持续发展具有一定的指导意义。

1 研究区域与研究材料

三工河流域位于新疆天山北麓中段, 准噶尔盆地南缘, 地理坐标: 北纬 43°09'~45°29', 东经 87°47'~88°17', 行政区属昌吉州阜康市。该流域由南部山区

经冲洪积扇绿洲逐渐过度到冲积平原绿洲和荒漠区(图 1), 呈现明显的山地、绿洲和荒漠过渡的景观格局^[20]。地势是南高北低, 由东南向西北倾斜。流域总面积约 1670 km², 其中绿洲区为 870 km², 多年平均温度 6.9℃, 多年平均降雨量 216 mm, 蒸发量为 1840 mm, 属于典型的干旱大陆性气候。

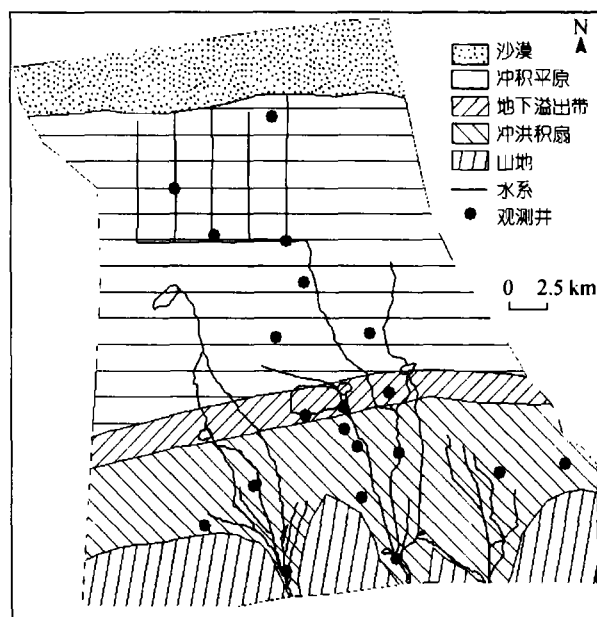


图1 三工河流域地貌分区图

三工河流域主要有 3 条河: 三工河、四工河和水磨河, 均发源于博格达山脉, 年均径流量分别为 5294×10^4 , 2538×10^4 和 $2088 \times 10^4 \text{ m}^3$. 河流来水量季节分配不均, 夏季占 52.80%, 春季是绿洲农业需水的最为重要的季节, 但来水量仅占 13.56%. 为了弥补春季农业缺水, 不足部分则通过开采地下水解决. 上游冲洪积扇绿洲灌溉水源以地表水为主, 地下水为辅. 下游冲积平原上部的六运湖农场地表水、地下水灌溉各占 50%, 下部阜北农场灌溉主要以开采溢出带地下水为主.

研究材料主要包括遥感数据和水文数据. 遥感数据包括三工河流域 1978 年 8 月 1: 35000 的航空照片 65 幅和 1987 年 9 月 TM 影像和 1998 年 8 月 ETM 影像各一景(4, 3, 2 波段), 利用 ERDAS IMAGE 图像处理软件和 1: 50000 地形图对上述影像进行图像处理, 生成 1978, 1987 和 1998 年 1: 50000 具有统一投影坐标(Transverse Mercator 投影)的影像图; 水文数据取自于三工河流域地下水环境监测试验站 20 世纪 60 年代以来的常年观测资料: 流域年平均地下水位数据(1977~2000 年)、三工河、四工河、水磨河径流量(1962~2001 年)、流域地下水补给量(1985~1999).

2 研究方法

2.1 径流量发生频率

依据三工河流域(三工河、四工河、水磨河)总径流量的历年监测数据(1962~2001 年), 计算不同年份总径流量的发生频率(p). $p > 95\%$ 为特枯水期; $75\% > p > 95\%$ 为枯水期; $50\% < p < 75\%$ 为平水期; $25\% < p < 50\%$ 为丰水期; $p < 25\%$ 为特丰水期. 表达式为: $p = (n/t + 1) \times 100\%$, n 为径流量发生频次, t 为统计年数. 计算出 1978, 1987 和 1998 年流域总径流量的发生频率, 反映出的相应年份水资源的状况.

2.2 遥感解译与 GIS 空间分析

考虑到本论文的研究区域为人工绿洲, 普遍具有强烈农业景观的特征, 对三工河流域绿洲土地利用/土地覆被分类采用土地利用现状分类系统^[21], 其在全国土地利用现状调查技术规程中具有明确的地类定义. 根据三工河流域绿洲的自然、社会经济特点确定分类系统的类型为耕地、林地、草地、建设及工矿用地、荒草地、盐碱地、水域和其他未利用地^[22]. 对经过图像处理后的三期(1978, 1987 和 1998)遥感影像, 结合各种相关专题信息及实际调查资料, 采用上

述分类系统在 ERDAS IMAGINE 下进行人机交互式解译, 解译形成的矢量图用 ARCTOOLS 的 CLEAN 及 BUILD 命令建立多边形的拓扑关系, 并进一步编辑图形数据和属性数据, 形成三期土地利用/土地覆被分类图.

2.3 地统计分析方法

地统计学方法日益被证实能够用来很好地描述环境的空间变异规律, 揭示自然现象的空间异质性和空间格局^[23,24], 在生态学领域应用日渐广泛^[25~27]. 半变异函数模型分析与克里格插值法是最常用的地统计分析方法^[28~31].

半变异函数(Semivariogram)是一个关于数据点的半变异值(或称变异性)与数据点间距离的函数, 对它的图形表述可以得到一个数据点与其相邻数据点的空间相关关系图. 可定义为:

$$\gamma(s_i, s_j) = 1/2 \text{ var}(Z(s_i) - Z(s_j)),$$

其中 var 就是变异系数.

当定量描述研究区的变异特征时, 还需要建立变异函数的理论模型, 再根据实验变异函数值进行理论模型曲线的确定和最优曲线的选择. 球体模型是最常用的拟合模型之一, 本文正是采用球体模型对研究区域地下水位进行半变异建模.

运用交叉验证的方法确定模型及与其相关参数值的设定是否合理. 交叉验证首先使用全部数据来评价自相关模型, 然后删除每个数据点, 一次一个, 并预测该点的值, 将所有预测值与观测值进行比较, 用计算的统计量可以对模型作出正确评价. 具体依据是让标准均值接近 0, 小的均值, 以及均方根标准差接近 1.

克里格(Kriging)方法依赖于数学模型和统计模型. 克里格法从预测点周围的观测值中生成权系数进而进行预测, 克里格权系数则通过反映数据空间结构的半变异图来计算, 其不仅取决于半变异图和距离预测点的距离, 还取决于预测点周围的观测值的空间关系. 克里格插值是一种最佳空间局部估计方法, 其作为地统计的主要分析方法, 综合考虑变量的随机性和结构性, 可以根据采样点的监测数据、采样点的相互位置关系及变差函数模型, 估测研究区域内相关点的空间变异性. 克里格法产生的估计量是线性、无偏和最优的. 本文采用普通克力格模型(Ordinary Kriging), 在观测值的半变异图和空间分布的基础上, 对研究区地下水位进行空间插值分析, 并

绘制等值线分布图。

3 结果与讨论

3.1 三工河流域地表水利用量及地下水开采量

依据历年三工河流域年径流量数据计算不同年径流量的发生频率。结果显示, 1978 年径流量发生频率为 34%, 处于丰水期; 1987 年为 51%, 处于平水期; 而 1998 年为 12%, 为特丰水期, 径流量达到 $10713 \times 10^4 \text{ m}^3$, 引入灌区地表水量为 $9462 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。但即使在特丰水期地表水资源也无法满足不断发展的绿洲对水资源的需求, 其结果是开发利用地下水。

流域地下水的补给量 15 年来变幅不大(图 2(a)), 平均年补给量约为 $6500 \times 10^4 \text{ m}^3$, 并且地下水的补给量随着地表水利用率提高, 有减少的趋势。而地下水的利用程度, 随着城市的扩张、耕地的大面积开垦, 有增加的趋势。

地表水利用率的提高, 主要通过充分利用现有水库和降低作物灌溉定额。结合地下水补给量和开采量进行综合分析其补给与排泄的过程, 反映出流域地下水超采量约 $900 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 流域上游(溢出带及以上)地下水开采量为 $4100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 动用地下水储量约 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 属地下水超采区, 地下水动态也反映出地下水位呈下降趋势, 该区域土地利用与土地覆被变化剧烈。流域下游(溢出带以下)

为地下水蒸发的主要区域, 特别是位于沙漠边缘的阜北农场年均蒸发量约为 $1933 \times 10^4 \text{ m}^3$, 上游约是其蒸发量的 10%。流域下游地下水开采量 $741 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 农业灌溉等主要依赖对溢出带地下水的开采, 该区域已经形成了一个水位降约 6~8 m 的降落漏斗区。

3.2 土地利用/土地覆被时空变化分析

通过人机交互式图像解译生成 1978, 1987 和 1998 年三期土地利用/土地覆被分类图, 提取各种土地类型面积变化信息进行对照分析, 充分显示出 20 年间不同土地利用类型的变化情况(表 1)。

20 年期间(1978~1998)耕地大面积增加, 增长幅度达到 13%, 为 28.97 km^2 , 主要分布于冲洪积扇绿洲、水源地四周和冲积平原绿洲区的上部; 城市、村庄为主的建设和工矿用地得到飞速发展, 增长幅度达到 166%, 为 34.83 km^2 , 主要是阜康市的外扩和准东石油基地的建立(10 km^2), 分布于冲洪积扇绿洲; 林地经历 1978~1987 年面积增加 25.01 km^2 后至 1998 年减少了 15.66 km^2 , 主要位于冲积平原上部; 荒草地、盐碱地总体趋势是大面积减少, 分别为 42.85 和 29.72 km^2 。荒草地和盐碱地的大面积减少直接或间接性的向耕地、建设和工矿用地发生了转移。城市和村庄为主地建设用地的扩张和以耕地为主的农业用地持续增加, 呈现以老绿洲(冲洪积扇绿洲、地下

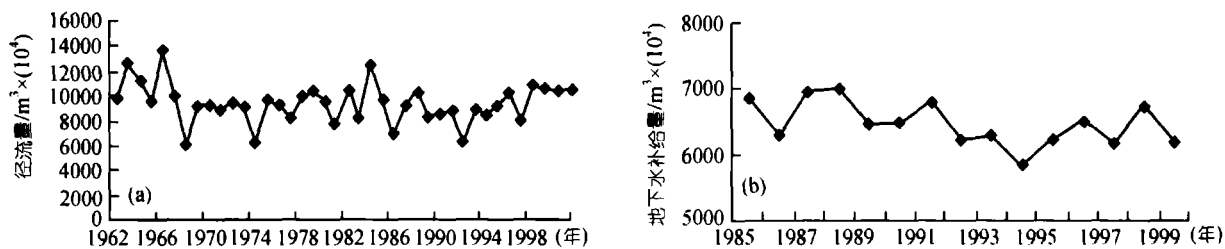


图 2 三工河流域年径流量(a)和地下水年补给量(b)变化

表 1 三工河流域土地利用/土地覆被变化情况(单位: km^2)

土地类型	1978	1987	1998	1978~1987 面积变化	1987~1998 面积变化	1978~1998 面积变化
耕地	221.92	240.90	250.89	18.98	9.99	28.97
林地	143.03	168.04	152.39	25.01	-15.66	9.36
草地	130.06	129.25	128.03	-0.80	-1.22	-2.03
建设及工矿用地	21.04	39.00	55.87	17.96	16.88	34.83
水域	17.36	14.27	15.57	-3.09	1.29	-1.79
荒草地	232.29	174.07	189.45	-58.23	15.38	-42.85
盐碱地	65.75	55.82	36.03	-9.93	-19.78	-29.72
其他未利用地	110.64	120.74	113.87	10.10	-6.87	3.23

水溢出带和冲积平原绿洲上部)为依托向四周扩张的地理分布.

3.3 地下水位时空变异性分析

(1) 半变异函数建模、预测及验证. 在 ArcGIS 软件平台下, 利用 Geostatistical analysis 分析模块, 采用半变异函数模型对研究区域 1987 年地下水位进行空间变异性预测模拟, 半变异函数采用球形函数进行拟合, 通过多次分组实验, 调整步长与步长组值, 确定最佳半变异函数拟合模型, 拟合结果如图 3 所示. 另外形成地下水位三维趋势图(图 4), 反映出地下水位由南向北逐渐降低, 东西向呈“U”型分布的趋势.

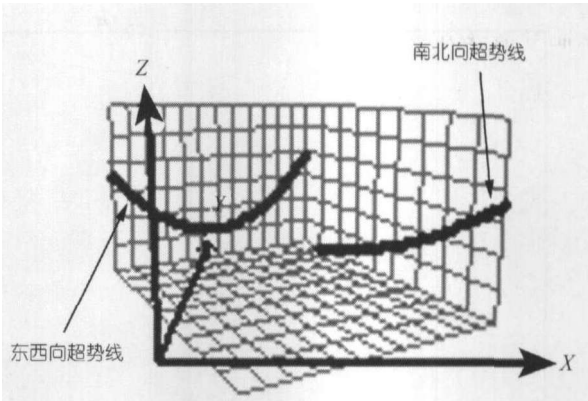


图 4 三工河流域地下水位三维趋势图

地下水位的块金值与基台值之比为 33.4%, 具有中等的空间相关性^[29], 空间自相关距离为 17.78 km (表 2). 表明其空间异质性主要由空间结构引起的, 空间结构与随机性因素共同作用于地下水. 空间结构如地形、地貌、气候、土壤类型等自然因素可以导致地下水位的空间相关性, 而随机性因素如城建、农垦、种植制度、灌排强度等人为活动使地下水位空间相关性减弱. 交叉验证结果显示误差特征参数满足验证需求, 证明模型及参数的设定合理, 拟合效果显著. 另外表 2 还反映出地下水位埋深的变异系数为 1.07, 属于高变异强度.

(2) 地下水位时空变异性. 依据上述半变异函数拟合模型方法, 结合普通克里格插值法生成 1978, 1987 和 1998 年三工河流域地下水埋深等值线图^[19,31](图 5). 以 5m 为间隔, 在地下水埋深最深为 5, 10, 15……60 m 的等值线区域提取面积信息(表 3), 进行三工河流域地下水位空间变异性分析¹⁾.

对比 1978, 1987 和 1998 年地下水埋深变化趋势, 结果表明: ① 流域整体地下水埋深空间尺度上由南

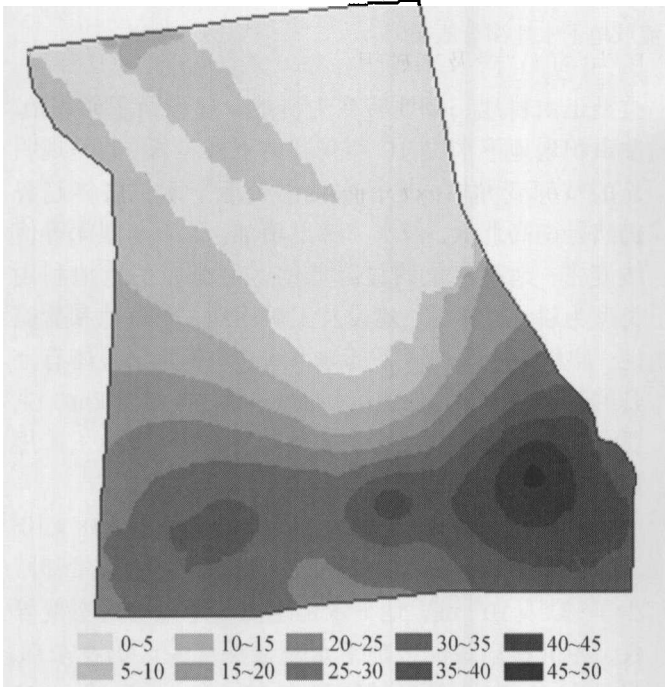


图 3 地下水位空间变异性分布图

表 2 地下水位半变异函数模型相关参数

时间	变异系数	块金值	基台值	块金值/基台值	空间相关距离	均方根标准差	标准均值	均值
1987	1.07	0.0177	0.053	33.4%	17.78 km	1.00	-0.006115	0.01298

表 3 1978, 1987 和 1998 年地下水埋深不同等值线区域面积变化(单位: km²)

时间	地下水埋深/m											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1978	261.07	223.57	125.97	48.07	80.60	105.01	53.85	43.96				
1987	298.78	152.51	66.82	57.54	74.87	134.29	81.67	55.22	18.95	1.45		
1998	267.64	141.04	86.05	52.81	73.57	75.88	69.66	86.18	54.72	23.42	9.44	1.67

1) 地下水位为 5 m 的等值线区域表示该区域地下水埋深最深为 5 m, 地下水埋深介于 0~5 m 之间. 10 m 的等值线区域表示该区域地下水埋深最深为 10 m, 地下水埋深介于 5~10 m 之间, 依次类推

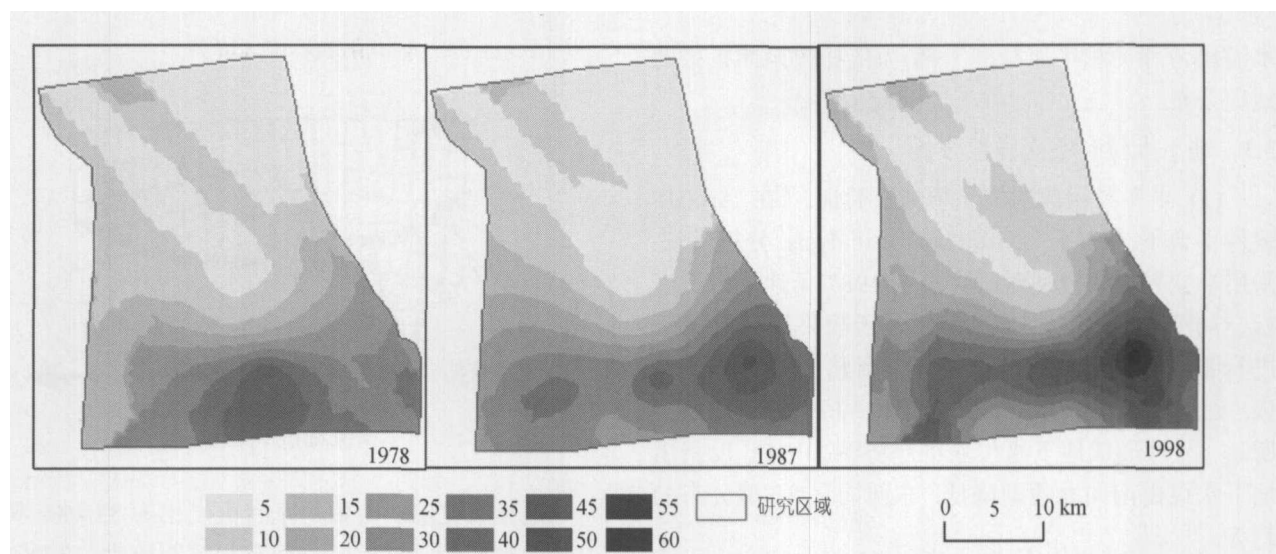


图5 1978~1998年三工河流域地下水埋深等值线图

向北逐渐变浅,时间尺度上整体呈下降趋势.上游出现了更深的地下水埋深区域.1978年流域地下水埋深区间介于5~40 m之间,到1987年增加了40~50 m的等值线区域,面积约为20.4 km²,1998年则增加了50~60 m的等值线区域,面积约为11.11 km²;②从1978年到1987年和1998年,绿洲上游(冲洪积扇,地下水溢出带)地下水埋深等值线逐渐变密,绿洲下游(冲积平原)依旧比较稀疏;③冲洪积扇绿洲区是地下水位时空变异性最剧烈的区域,20年间地下水位最深区域由中部向东部转移,由40 m等值区域降低到60 m等值区域.35~50 m等值区域面积逐年扩大,扩张趋势由东向西;④地下水溢出带地下水位区域由1978年10~20 m区间,至1987年变为15~20 m区间,至1998年则变为15~25 m区间,地下水位总体呈下降趋势;⑤冲积平原地下水位等值区间基本稳定,基本位于5~10 m的等值线区域内.

3.4 土地利用/土地覆被变化对地下水位时空变异性影响

将1978,1987和1998年土地利用和土地覆被变化信息与1978,1987和1998年地下水位时空变异信息叠加分析提取出不同地下水埋深区域不同土地利用类型变化信息(表4),建立两者之间的互动关系.

1978~1987年,地表水年径流量减少 6.31×10^6 m³,由丰水期转变为平水期,地下水位时空变异性发生了显著的变化:冲洪积扇绿洲区地下水位最深区域由中部向东部转移,由35~40 m的区域降低为40~50 m的区域,最深区域主要土地利用/土地覆被

类型也由耕地、草地转变为耕地、建设及工矿用地.冲洪积扇地下水位10年来整体下降显著,并呈现明显的空间变异性;地下水溢出带地下水位整体趋势仍然是南高北低,但水力梯度增加,地下水埋深等值线变密,地下水位明显降低的区域分布的土地利用类型为耕地、林地、建设及工矿用地、荒草地和盐碱地;冲积平原绿洲区下部地下水位10年来整体有上升的趋势,5 m等值线区域面积扩大了37.7 km²,主要分布的土地利用类型为耕地、林地、建设及工矿用地和其他未利用地.

1987~1998年,地表水年径流量增加了 1.38×10^7 m³,由平水期转变为特丰水期,地下水年补给量却减少了 2.0×10^6 m³,地下水位也发生了显著时空变异性.冲洪积扇绿洲区地下水位最深埋深区仍在东部,只是由40~50 m的区域转移为50~60 m的区域.1987年最深50 m等值线区域面积仅为1.4 km²,1998年最深地下水位在50~60 m区域则扩大到34.5 km²,区域主要土地利用/土地覆被类型为耕地、林地、建设及工矿用地和荒草地.地下水溢出带水力梯度增加,地下水埋深由15~20 m等值线区域转变为15~25 m区域.主要土地利用变化为耕地、林地、荒草地显著增加,盐碱地显著减少;冲积平原绿洲区地下水埋深在5和10 m的等值线区域面积分别减少31.2和11.5 km²,可见地下水位整体为下降趋势.地下水位降低区域主要土地利用类型为耕地、林地和荒草地.

4 结论

三工河流域绿洲地下水位变异系数为1.07,属

表 4 1978, 1987 和 1998 年不同地下水埋深等值线区域 LUCC 情况(单位: km²)

时间	地下水埋深等值线	耕地	林地	草地	建设及工矿用地	水域	荒草地	盐碱地	其他未利用地	合计
1978	5	65.73	33.61	0.00	4.10	0.00	72.79	9.46	75.37	261.07
	10	43.34	56.29	0.00	2.10	6.96	97.88	2.01	15.00	223.57
	15	17.20	32.90	19.27	1.15	1.65	25.60	18.52	9.69	125.97
	20	20.17	1.94	2.14	1.54	0.37	8.09	13.81	0.00	48.07
	25	32.67	7.11	5.79	5.13	0.31	9.61	19.20	0.78	80.60
	30	22.50	10.11	40.20	4.75	3.14	14.71	2.74	6.84	105.01
	35	11.41	1.06	32.12	0.55	3.72	3.61	0.00	1.37	53.85
	40	8.90	0.00	30.53	1.72	1.22	0.00	0.00	1.59	43.96
1987	5	75.06	48.12	0.00	6.92	0.00	77.73	9.12	81.85	298.78
	10	34.66	33.05	0.00	2.24	4.90	52.89	0.52	24.25	152.51
	15	15.41	28.01	0.00	1.67	0.71	7.92	8.09	5.00	66.82
	20	19.51	17.48	0.00	1.79	0.04	6.73	11.99	0.00	57.54
	25	20.22	18.65	15.05	4.24	0.87	7.91	7.93	0.00	74.87
	30	27.09	10.72	70.22	12.03	2.92	2.90	7.46	0.96	134.29
	35	26.77	0.69	38.49	3.66	1.38	1.79	7.87	1.02	81.67
	40	14.84	10.91	5.49	4.96	3.39	6.93	2.85	5.86	55.22
	45	6.95	0.43	0.00	0.63	0.01	9.12	0.00	1.81	18.95
	50	0.39	0.00	0.00	0.85	0.05	0.16	0.00	0.01	1.45
1998	5	68.30	57.81	0.00	7.58	0.00	50.22	5.80	77.93	267.64
	10	43.73	7.74	0.00	3.34	4.19	53.89	11.62	16.55	141.04
	15	12.58	32.09	0.00	1.29	3.58	24.11	2.26	10.14	86.05
	20	13.52	16.98	0.76	1.05	0.53	16.35	3.61	0.00	52.81
	25	14.83	9.91	29.80	2.55	1.29	11.36	3.75	0.08	73.57
	30	16.63	15.47	25.61	5.57	0.94	9.57	1.40	0.70	75.88
	35	17.74	0.30	27.93	13.86	0.99	8.36	0.09	0.39	69.66
	40	27.65	3.72	28.87	10.84	1.75	7.97	4.27	1.12	86.18
	45	18.51	3.67	14.78	5.42	2.17	3.03	3.24	3.89	54.72
	50	10.08	4.69	0.28	2.51	0.06	3.02	0.01	2.77	23.42
	55	6.94	0.00	0.00	0.63	0.03	1.54	0.00	0.30	9.44
	60	0.38	0.00	0.00	1.23	0.03	0.03	0.00	0.00	1.67

于高变异强度. 通过半变异函数模型分析, 显示地下水位具有中等的空间相关性(33.4%), 空间自相关距离为 17.78 km. 这是由于空间结构如地形、气候、土壤类型等自然因素与随机性因素如城建、农垦、种植制度、灌排强度等人为活动共同作用的结果.

利用普通克里格插值法绘制了地下水埋深等值线图, 反映出流域 1978~1998 年间整体地下水位呈上游急剧下降、下游经过缓慢上升又缓慢下降的趋势. 地下水埋深等值线区间由 1978 年的 0~40 m 转变为 1998 年的 0~60 m, 上游出现了更深的地下水位等值区域(40~60 m).

通过遥感解译与 GIS 空间分析, 显示出 1978~1998 年 20 年间三工河流域绿洲土地利用/土地覆被发生了显著的时空变化. 变化剧烈的区域位于绿洲

的上游, 主要表现为以建设及工矿用地为主的非农业用地和以耕地为主的农业用地的持续增加, 以及荒草地和盐碱地的大面积减少.

绿洲土地利用/土地覆被时空变化与地下水位时空变异性之间具有密切的相关性. 耕地、林地、建设及工矿用地土地资源开发加剧的区域也是地下水位急剧变化的区域. 绿洲随着城市、工矿用地为主的非农业用地和以耕地为主的农业用地的持续增加, 引发了地下水水位时空变异性响应. 同时通过本研究反映出运用地统计分析方法分析地下水位时空变异性具有一定的适用性, 更加证实其在景观生态学领域的应用.

致谢 本工作为中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-326-03 和 KZCX3-SW-327-01)资助.

参 考 文 献

- 1 马金珠, 李吉均. 塔里木盆地南缘人类活动干扰下地下水的变化及其生态环境效应. 自然资源学报, 2001, (2): 134—139
- 2 Collin M L, Melloul A J. Combined land -use and environmental factors for sustainable groundwater management. Urban Water, 2001, (3): 229—237
- 3 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 中国西北干旱区的地下水资源及其特征. 自然资源学报, 2002, (3): 321—326
- 4 严登华, 王浩, 王建华, 等. 国际水文计划发展与中国水资源研究体系构建. 地理学报, 2004, (2): 249—259
- 5 谢新民, 颜勇. 浅析西北地区地表水与地下水之间的相互转化关系. 水利水电科技进展, 2003, (1): 8—10
- 6 Al-Adamat R A N, Foster I D L, Baban S M J. Groundwater vulnerability and risk mapping for the basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. Applied Geography, 2003, (23): 303—324
- 7 崔亚莉, 邵景力, 李慈君. 玛纳斯河流域地表水、地下水转化关系研究. 水文地质工程地质, 2001, (2): 9—14
- 8 郭旭东, 陈利顶, 傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响. 环境科学进展, 1999, (6): 66—75
- 9 丁宏伟, 张举. 干旱区内陆平原地下水持续下降及引起的环境问题. 水文地质工程地质, 2002, (3): 71—74
- 10 于兴修, 杨桂山. 典型流域土地利用/覆被变化对水质的影响. 长江流域资源与环境, 2003, (3): 211—217
- 11 Kampbell D H, An Y J, Jewell K P, et al. Groundwater quality surrounding Lake Texoma during short-term drought conditions. Environmental Pollution, 2003, 125: 183—191
- 12 张武文, 史生胜. 额济纳绿洲地下水动态与植被退化关系的研究. 冰川冻土, 2002, (4): 421—425
- 13 汤梦玲, 徐恒力, 曹李靖. 西北地区地下水对植被生存演替的作用. 地质科技情报, 2001, (2): 79—82
- 14 Mahmood K, Morris J, Collopy J, et al. Groundwater uptake and sustainability of farm plantations on saline sites in Punjab province, Pakistan. Agricultural Water Management, 2001, (48): 1—20
- 15 马金珠, 朱中华, 李吉均. 塔克拉玛干沙漠南缘地下水在脆弱生态环境中的作用. 兰州大学学报, 2000, (4): 88—95
- 16 Wang Y, Ma T, Luo Z. Geostatistical and geochemical analysis of surface water leakage into groundwater on a regional scale: a case study in the Liulin karst system, northwestern China. Journal of Hydrology, 2001, 246: 223—234
- 17 李小玉, 宋冬梅, 肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异. 地理学报, 2005, 2: 319—327
- 18 Mouser P J, Hession W C, Rizzo D M, et al. Hydrology and Geostatistics of a Vermont, USA Kettlehole Peatland. Journal of Hydrology, 2005, 301: 250—266
- 19 Finke P A, Brus D J, Bierkens M F P, et al. Mapping groundwater dynamics using multiple sources of exhaustive high resolution data. Geoderma, 2004, 123: 23—39
- 20 王玉朝, 赵成义. 三工河流域景观格局的形成与环境分异特征. 水土保持学报, 2001, (3): 98—101
- 21 闫金凤, 陈曦, 罗格平, 等. 绿洲浅层地下水位与水质变化对人为驱动 LUCC 的响应——以三工河流域为例. 自然资源学报, 2005, (2): 172—180
- 22 张征, 赵俊琳, 王红旗, 等. 水环境污染迁移参数空间变异性分析原理与方法. 北京师范大学学报(自然科学版), 1998, (4): 542—548
- 23 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. 53—87
- 24 Pebesma E J, Kwaadsteniet J W. Mapping groundwater quality in the netherlands. Journal of Hydrology, 1997, 200: 364—386
- 25 Cinnirella S, Buttafuoco G, Pirrone N. Stochastic analysis to assess the spatial distribution of groundwater nitrate concentrations in the Po catchment (Italy). Environmental Pollution, 2005, 133: 569—580
- 26 Wingle W L, Poeter E P, Mckenna S A. UNCERT: geostatistics, uncertainty analysis and visualization software applied to flow groundwater and contaminant transport modeling. Computers & Geosciences, 1999, 25: 365—376
- 27 胡克林, 李保国, 陈德立. 区域浅层地下水埋深和水质的空间变异性特性. 水科学进展, 2000(4): 408—414
- 28 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征. 地理学报, 2000, (5): 555—566
- 29 Vijendra K B, Gerrit H, James E H, et al. Agricultural water use estimation using geospatial modeling and a geographic information system. Agricultural Water Management, 2004, 67: 185—199
- 30 Desbarats A J, Logan C E, Hinton M J, et al. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevationmodel. Journal of Hydrology, 2002, 255: 25—38
- 31 Christakos G, Hristopulos D T, Bogaert P. On the physical geometry concept at the basis of space/time geostatistical hydrology. Advances in Water Resources, 2000, 23: 799—810

(2005-07-20 收稿, 2006-01-16 收修改稿)