

新疆三工河流域尾间绿洲地下水变化 与土壤积盐的响应

王玉刚^{1,3}, 肖笃宁^{1,2}, 李彦¹, 李小玉²

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 研究地下水动态和土壤积盐过程有助于了解地下水抬升对土壤积盐的作用规律, 合理利用水资源, 防止土壤盐渍化。根据 1985 年、2000 年和 2005 年的地下水等值线图资料, 结合研究区 1983 ~ 2005 年水资源利用和 0 ~ 20 cm 土壤层总盐数据以及土地利用数据, 利用 GIS 技术和地统计学方法, 分析了近 23a 来地下水动态, 以及地下水抬升与地表积盐的关系。结果表明: 区域输水灌溉是地下水水位抬升的直接动因。年均地下水水位抬升 0.09 m, 地下水水位每抬升 1 m, 造成区域地表积盐区增加 144.45 hm², 地下水位的抬升对区域灌溉景观的积盐面积的扩张作用要强于非灌溉景观, 在灌溉景观中耕地积盐速率最快, 达 0.43 t·hm⁻²·a⁻¹, 23a 间, 单位面积的积盐量增加了 40.04%, 在非灌溉景观中, 盐碱地的积盐作用较强, 积盐速率达 0.68 t·hm⁻²·a⁻¹。

关键词 绿洲 地下水 土壤积盐 地统计学; GIS

文章编号 1000-0933 (2007) 10-4036-09 **中图分类号** Q142, S151.1, S154.4, S156.4 **文献标识码** A

Response of salt accumulation in soil to groundwater changes at the oasis in the lower reaches of Sangong River, Xinjiang

WANG Yu-Gang^{1,3}, XIAO Du-Ning^{1,2}, LI Yan¹, LI Xiao-Yu²

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China

2 Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (10): 4036 ~ 4044.

Abstract: The current study is focused on the relationship between groundwater and the soil salt accumulation in inland river basins, which is important in understanding the interaction between the rising groundwater table and soil salt accumulation, preserving water resources and preventing soil salinization. Based on the groundwater table charts of 1985, 2000 and 2005, the water resources data from 1983 to 2005, as well as data of total soil salt at 0—20cm and the data of land use for the same period, with geo-statistics and GIS methods, analysis was done on the temporal-spatial changes in regional landscape and soil salt accumulation, as well as the relationship between the level of groundwater table and salt accumulation in the soil. The results revealed that importing of water to this region for irrigation was the main cause that resulted in the rising of groundwater table. Groundwater table rose at 0.09m per year for the last 23 years. And with 1m

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40501068) 中国科学院西部之光资助项目; 亚洲太平洋区环境创新战略项目 (APEIS) 环境综合监测子课题资助项目

收稿日期 2006-08-30; **修订日期** 2007-01-14

作者简介 王玉刚 (1976 ~), 男, 新疆石河子人, 博士生, 主要从事绿洲景观生态学和人文水资源研究. E-mail: xj_wyg@163.com

Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40501068); The “Western Light” project of CAS; Integrated Environmental Monitoring Subproject, the Asia-Pacific Environmental Strategy Project

Received date 2006-08-30; **Accepted date** 2007-01-14

Biography WANG Yu-Gang, Ph. D. candidate, mainly engaged in oasis landscape ecology and water resources. E-mail: xj_wyg@163.com

increase in groundwater table, the area of soil salt accumulation expanded 144.45hm². In the irrigated landscape, the groundwater table had more significant effect on the expansion of soil salt accumulation area than that in non-irrigated landscapes. The rate of soil salt accumulation in the cropland was 0.43t·hm⁻² per year from 1983 to 2005 ; with salt content increased 40.04% during this period, which was the fastest among irrigated landscapes. While among the non-irrigated landscape, the most significant salt accumulation in soil occurred in Saline alkali land, with a rate of 0.68t·hm² per year.

Key Words : oasis ; groundwater ; salt accumulation in soil ; geostatistics ; GIS

土壤次生盐渍化是西北内陆平原区主要生态环境问题之一,其发展已成为威胁绿洲稳定与安全的重要因素^[1,2]。特别是内陆河下游尾间绿洲,由于不当的灌溉,地下水中的盐分不断积累、浓缩,使得绿洲土壤中的盐分不断增加,土壤盐碱化严重,这不仅严重影响了尾间绿洲社会经济的发展,对绿洲自身的生态安全有着很大的威胁^[1]。土壤盐渍化的发生发展受到多种因素的影响,其成因与地下水水位抬升存在密切关系,在干旱区造成土壤盐渍化的最直接原因是由于地下水水位的抬升以致地下水埋深超过临界深度的地下水水位^[4,5]。长期以来,监测和量化土壤盐渍化过程在环境科学中起到重要作用^[6]。三工河流域绿洲属温带荒漠性气候,地带性土壤为灰漠土,土壤次生盐渍化现象普遍存在。流域中上游老绿洲是以河水灌溉的农业生产区,农业耕作已有几百年的历史,流域尾间绿洲区为流域下部的新垦绿洲,区域始建于1960年,土地开发历史较短,是一个以地下水和水库输水为主要灌溉水源的农业生产区。由于尾间绿洲不适当的灌溉,使得地下水水位抬升,土壤的次生盐渍化现象日趋严重,大量耕地被迫撂荒^[1,8]。本文以三工河流域尾间绿洲区的阜北农场为例,通过分析区域水资源动态以及与土壤表层积盐的关系,准确理解尾间绿洲水土资源,特别是区域灌溉用水和地下水的开发利用对绿洲现代积盐过程的影响,有助于了解流域内土壤盐渍化的空间特征和发生机理,为该地区合理灌溉和防止土壤次生盐渍化提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山北麓三工河流域尾间绿洲区(图1),准葛尔盆地南缘(87°47'30"~88°01'15"E, 44°17'30"~44°22'30"N),北接古尔班通古特沙漠,行政区划在新疆昌吉州阜康市境内阜北农场,为洪积扇边缘潜水溢出带。该农场始建于1960年,为人工新垦绿洲。由于处于下游的冲积平原为细土平原,地形平坦,排水不畅,因灌溉使得潜水层水位不断抬升,部分地方潜水埋深甚至不到1m,土壤次生盐渍化成为该区域生产力下降和耕地弃耕的重要因子。地势东南高西北底,纵坡一般2‰~2.5‰,高程454.3~485.4m,相对高差31.1m,东西长19.2km,南北宽平均8.8km,总面积约169km²。自然景观属欧亚大陆中部温带荒漠气候类型,夏季炎热干燥,冬季严寒,降水稀少,蒸发量大,每年6~7月份,常受干热风危害。年均气温6.6~7℃,农作物生长期平均气温在20℃以上,无霜期170~175d,结冻期140d。年降水量88~246mm之间,年均降水量152mm。年蒸发量1667.7~2302.8mm,年均蒸发量为1897.4mm。区域农作物主要有棉花、小麦、酒花和葡萄,以棉花、葡萄作物为主。

1.2 研究方法

研究区基本数据来源及其处理方法,主要包括以下3个方面:

(1)水资源数据及其处理 研究区地下水监测资料、区域地下水开采和区域灌溉资料来自于当地管理部门,并且运用统计软件SPSS11.5a统计分析功能,对地下水监测井全年各月5个时段(1983、1985、1999、2000、2005年)地下水水位进行LSD差异性检验,再根据区域1985年、2000年和2005年地下水位等值线调查图,在Arcview3.2a环境下,得到1983年、1999年和2005年地下水位引起土壤表层积盐区图,结合土地利用图和土壤盐度分布图,再进行叠加运算(Grid格式Combine),分析区域地下水引起的潜在积盐区与土地利用的关系。

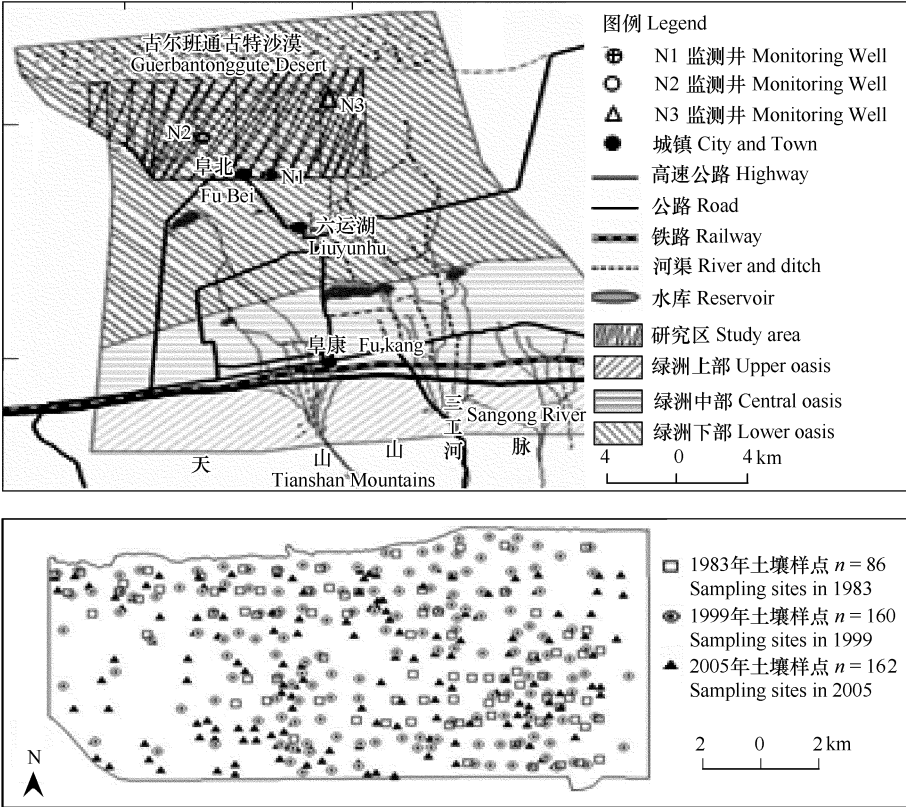


图 1 研究区位置、监测井和土壤样点图

Fig. 1 Location map, the monitoring well and soil sampling sites in the study area

地下水位上升所形成的土壤表层潜在积盐区范围的确定依据:研究表明^[1],当地下水埋深在 1.5 ~ 2.5 m 时,盐离子就可在蒸发作用下通过土壤空隙或者通过植物在土壤层积累,在盐渍化地区,地下水水位小于 2.5 m 是土壤积盐的临界水位,当地下水位较浅时,土壤水分蒸发及地下水的毛细管上升作用,促使表层积盐。依据天山北坡潜水埋深的研究试验^[2],地下水位划分为 <1 m (积水沼泽化), 1.0 ~ 1.5 m (强蒸发积盐), 1.5 ~ 2.0 m (中等蒸发积盐), 2.0 ~ 2.5 m (弱蒸发积盐), >2.5 m (安全深度),由此确定地下水位 2.5 m 为土壤表层积盐临界水位线。根据研究区不同时期的地下水等值线图,得到 1983 ~ 2005 年各时期地下水位小于 2.5 m 的区域,即为地下水位抬升作用形成的土壤表层潜在积盐区(图 2),通过与区域景观分布图进行叠加,得到地下水位作用形成的积盐区(地下水位 <2.5 m 区域)在各时期各景观类型中的分布。

① 土壤表层总盐空间特征分析 1983 年的数据来自当年全国第二次土壤普查的 0 ~ 20 cm 土壤总盐分析资料,共有 86 个样点值,根据数据记载位置,参考研究区 1983 年 1:10000 土地利用类型图、条田档案资料,采用 GPS 对样点进行现地定位;1999 年数据采用当年的区域土壤 0 ~ 20 cm 总盐含量分析资料 新疆农科院

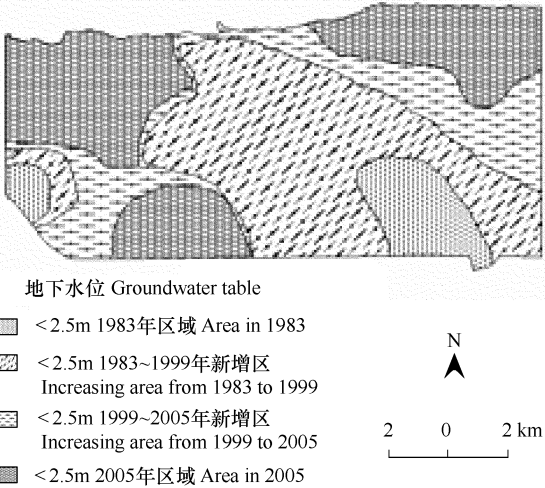


图 2 研究区 1983 ~ 2005 年地下水位动态分布图

Fig. 2 Distribution map of groundwater table from 1983 to 2005

分析中心),样点为 160 个,样点位置结合研究区 1999 年 1:10000 区域条田规划及种植结构现状图,采用 GPS 对样点进行定位 2005 年数据是于当年 9 月份对全区域不同土地利用类型、种植结构类型和土壤类型通过 GPS 定位进行全区域采样,对土壤样品采用中国生态系统研究网络观测与系统分析标准方法 [3] 进行总盐分析 新疆生态地理研究所分析中心),计 162 个样点。

区域土壤表层积盐空间分析采用地统计学方法,该方法是在传统统计学基础上发展起来的空間分析方法,不仅能够有效揭示属性变量在空間上的分布变异特征,而且能够有效解释空間格局对生态过程与功能的影响,同时被证明是研究空間变异和空間格局的有效方法之一 [4~16]。对于空間格局的分析,在地统计学中,变异函数是基本的方法,为区域变量 $z(x_i)$ 和 $z(x_i+h)$ 增量平方的数学期望,即区域化变量的方差。其通式为 [17]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2$$

式中, $\gamma(h)$ 为变异函数 h 为步长,即为了减少各样点组合对的空間距离个数而对其进行分类的样点空間间隔距离 $N(h)$ 为间隔距离为 h 时的样点对数 $z(x_i)$ 和 $z(x_i+h)$ 分别是变量 Z 在空間位置 x_i 和 x_i+h 上的取值。在 ArcGIS 的 Geostatistical Analyst 地统计模块支持下,采用普通克立格插值法 (Ordinary Kriging) 进行空間插值,得到 3 期 (1983 年、1999 年、2005 年) 区域土壤总盐的空間分布图,在插值图精度检验 [18] 的基础上,利用土地利用图进行叠加运算,分析土壤总盐空間分异与土地利用的关系。

④ 土地利用类型数据 分别将研究区 1983 年和 1999 年的 1:10000 土地利用现状图,经过几何校正 (ERDAS IMAGINE8.6 软件) 和数字化 (R2V 软件),在地理信息系统 (GIS) 支持下产生景观类型图。2005 年的景观类型图的产生,通过对 2004 年的 spot 影像 (2004 年 6 月 12 日,分辨率 10 m×10 m) 目视解译,结合区域 2005 年 1:10000 条田规划图以及条田档案资料,并经现场 GPS 定位调查,获取当前景观类型数据。根据研究区积盐景观特征,将研究区景观类型划分为灌溉景观区 (耕地、园地和有林地) 和非灌溉景观区 (灌木林地、荒草地、盐碱地和居民地)。

2 结果与分析

2.1 不同时段监测井地下水位的统计描述

由于与 1983 年和 1999 年土壤积盐图所配准的地下水等水位分布图无当年资料,为了获取配准资料,采用 1985 和 2000 两年的地下水位等值线图来反演 1983 年和 1999 年地下水位等值线图,由此获取配准资料。通过对研究区三口常年监测井不同时期各月地下水位动态进行 LSD 检验 (表 1),三口常年监测井 N1、N2 和 N3 的数字高程分别为 475.7、464.8 m 和 466.97 m,LSD 检验的结果表明 1983 年与 1985 年三口监测井全年地下水位无明显的差异性 ($p < 0.01$),置信度达 99%,并且 1999 年与 2000 年地下水位无明显差异性 ($p < 0.01$),而 1983 年、1999 年和 2005 年地下水位的动态均表现出不同程度的差异性 (表 1)。由此可以看出监测井 1983 年与 1985 年、1999 年与 2000 年区域地下水位的动态无显著变化,说明在 1983 年与 1985 年、1999 年与 2000 年研究区地下水水位在空間分布上无显著差异 ($p < 0.01$),因此分别用 1985 年和 2000 年的地下水位等值线图来反演 1983 年和 1999 年地下水位等值线图是可行的,置信度达 99% 以上。

2.2 地下水引起的积盐区域在景观中的分布特征

通过对同期地下水位所引起的积盐区域与景观分布图的叠加运算,得到地下水上升作用形成的潜在积盐区在景观中的分布表 (表 2)。可以看出,随着地下水位的抬升作用不断加强,地表积盐区的面积不断扩大,从 1983 年到 2005 年 23a 间,地下水抬升作用引起的地表积盐区年均扩大 396.37 hm²,其中灌溉景观中的积盐区面积 2005 年比 1983 年增加了 4892.64 hm²,非灌溉景观中增加了 4223.78 hm²,说明地下水位的抬升对区域灌溉景观的积盐扩张作用要强于非灌溉景观,同时地下水位年均抬升 0.09 m,地下水位每抬升 1m,造成区域地表潜在积盐区增加 144.45 hm²。并且耕地景观类型的分布面积最多,所占比重最大,扩展面积最多,23 年间新增 2586.02 hm² 耕地受地下水抬升作用的影响,发生潜在盐化,其他景观类型面积虽然都有所增加,相

比耕地要小。

表 1 不同时期监测井地下水水位动态

Table 1 Dynamic of the monitoring well's groundwater table in different period						
年份 Year	N1 监测井 (n) N1 monitoring well		N2 监测井 (n) N2 monitoring well		N3 监测井 (n) N3 monitoring well	
	M ± SD	MC	M ± SD	MC	M ± SD	MC
1983	4.14 ± 1.25	Aa	2.72 ± 0.08	Aa	3.97 ± 0.16	Aa
1985	3.39 ± 1.13	Aa	2.73 ± 0.11	Aa	3.90 ± 0.23	Aa
1999	1.84 ± 0.68	BCbc	1.21 ± 0.16	Bbc	2.82 ± 0.21	Bb
2000	1.71 ± 0.53	Bb	1.34 ± 0.27	Bb	2.91 ± 0.17	Bb
2005	2.42 ± 0.98	Cc	1.18 ± 0.21	Be	2.36 ± 0.21	Cc

表中数据 M 为 均值 The date are means ;SD 标准差 Standard Deviation ;MC 多重比较 Multiple Compare 同列字母相同者,为差异性不显著,字母不同者,大写字母表示差异性极显著 ($P < 0.01$),小写字母表示差异性显著 ($P < 0.05$) In the same column, values with the same letter indicate no significant difference, the different capital letter means significant difference at $P < 0.01$, and the different small letter means significant difference at $P < 0.05$

表 2 不同时期积盐区在景观中的分布特征

Table 2 Distribution character of soil salt accumulation in landscape types in different periods							
景观类型 Landscape type		1983		1999		2005	
		面积	所占比例	面积	所占比例	面积	所占比例
		Area (μm ²)	Percent (%)	Area (μm ²)	Percent (%)	Area (μm ²)	Percent (%)
灌溉景观 Irrigative landscape	园地 Orchard land	24.07	1.71	102.58	1.37	1647.99	15.66
	耕地 Crop land	779.19	55.42	3175.53	42.32	3536.21	33.61
	人工林地 Artificial forest	9.55	0.68	252.61	3.37	521.26	4.95
	灌木林地 Shrubbery land	91.93	6.54	770.89	10.27	958.72	9.11
非灌溉景观 Non-irrigative landscape	居民地 Residential area	48.39	3.44	384.16	5.12	409.89	3.90
	草地 Grass land	199.64	14.20	1532.72	20.42	1337.32	12.71
	盐碱地 Saline alkali land	253.10	18.00	1285.68	17.13	2111.09	20.06

2.3 不同时期土壤表层积盐的描述性统计分析

对于采用变异函数法,首先要求数据要符合正态分布,否则可能出现比例效应^[4,17],在 SPSS11.5a 软件中的统计分析模块中采用 Kolmogorov-Smirnov 法,检验各时期土壤总盐数据是否服从正态分布。通过对 1983 年、1999 年和 2005 年 3 期样本的统计分析及其正态检验 (表 3),结果表明:1983 年、1999 年和 2005 年 3 期样本正态分布的 K-S 检验的统计描述的结果,符合正态分布,并且,土壤总盐的变异系数在 0.5 左右,属于中等变异强度^[19]。从变幅来看,最小值与最大值之间变差较大,这反映了土壤总盐在区域上分布特征,不同的景观类型和不同地形区域积盐程度不同。描述性统计与正态分布检验的结果,完全满足变异函数的要求。

表 3 土壤总盐的描述性统计及正态分布检验

Table 3 Results of soil total salt for descriptive statistics and K-S test									
时间 Time	样本 Sample	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV%	最小值 Minimum	最大值 Maximum	偏斜 Skewness	峭度 Kurtosis	K-S 值 Value of K-S
1983	86	0.845	0.406	0.4805	0.04	6.01	1.35	1.57	2.21
1999	160	0.535	0.232	0.434	0.10	6.17	1.52	2.72	2.51
2005	162	1.992	1.093	0.568	0.07	6.24	0.29	-1.34	2.72

变异函数的理论模型及参数的确定可参考有关文献^[7,20],根据变异函数公式分别计算 1983 年、1999 年

和 2005 年 3 期样本的变异函数值,经过理论模型的最优拟合结果,均符合指数模型。决定系数都大于 0.6,而残差平方和都较小 (0.0006、0.0001 和 0.0012),理论模型的 F 检验在 $\alpha = 0.01$ 水平达到极显著 (表 4),表明所建立的拟合理论模型具有很好的实际应用性^[7],拟合得到的指数模型能够很好的反映土壤积盐的空间结构特征。根据所得到的变异函数模型,利用 Kriging 空间插值,绘制了区域表层土壤 (0~20cm) 总盐分布图 (图 3)。

表 4 土壤总盐变异函数理论模型参数和模型 F 检验

Table 4 Correlation parameters and F -test of theoretical variogram models of soil total salt									
时间 Time	理论模型 Theoretical Model	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill ($C_0 + C$)	块金值/基台值 Nugget/Sill (%) ($C_0 / C_0 + C$)	变程 Rang	分维数 Dimension	决定系数 R^2	残差平方和 RSS	F 检验 F test
1983	指数模型 exponential	0.0234	0.1706	0.1424	1.26	1.92	0.511	0.0006	7.68 **
1999	指数模型 exponential	0.0058	0.0395	0.1468	1.29	1.905	0.584	0.0001	20.92 **
2005	指数模型 exponential	0.0338	0.2774	0.1218	1.59	1.937	0.803	0.0012	61.54 **

** 表示 $\alpha = 0.01$ 水平 F 检验的显著水平, F -test, significance at $\alpha = 0.01$

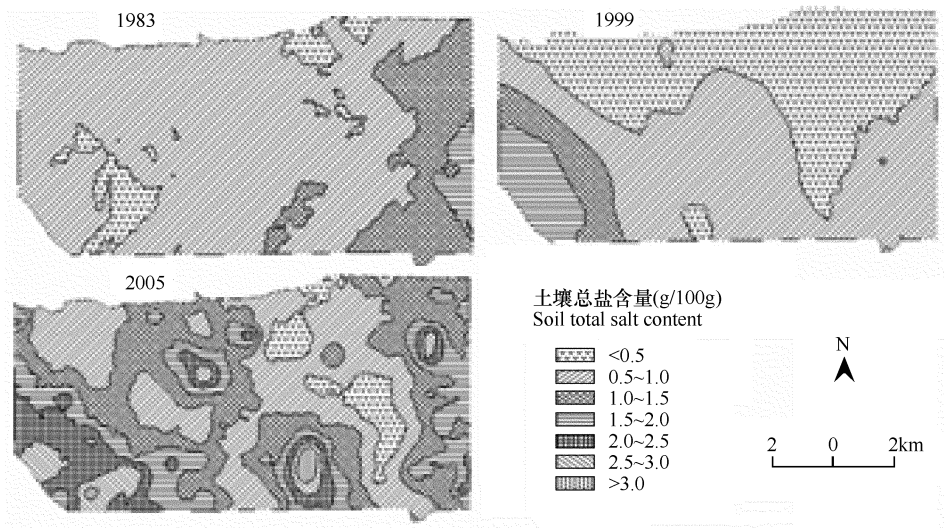


图 3 研究区土壤总盐含量分布图

Fig. 3 Distribution map of soil total salt content in the study area

2.4 地下水动态与地表积盐过程的关系

通过对地下水引起的潜在积盐区景观与区域地表土壤总盐分布图的叠加,得到各个时期相同景观类型土壤表层单位面积积盐量 (表 5) 和各景观的积盐速率图 (图 4)。由表 5 可以看出,由于地下水位的不断抬升,在地表强烈的蒸发作用下,水分将盐分带至地表,造成区域各景观类型的土壤表层单位面积积盐量的增加,其中在非灌溉景观中,盐碱地景观类型的单位面积积盐量明显高于其他景观类型,从 1983 到 2005 年,单位面积积盐量增加了 56.77%,积盐速率达 $0.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。说明在研究区内,地下水抬升作用,引起的地表积盐,在盐碱地中积盐作用强于其他非灌溉景观类型,积盐速率最大 (图 4)。在灌溉景观类型中,耕地的积盐作用强于其他景观类型,积盐速率最快,达 $0.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,并且单位积盐量由 1983 年的 $23.40 \text{ t} / \text{hm}^2$ 增加到 2005 年的 $32.77 \text{ t} / \text{hm}^2$,单位面积的积盐量提高了 40.04%。无论是灌溉景观类型还是非灌溉景观类型,单位面积积盐量随着时间的推移,具有显著的差异性 ($p < 0.05$),说明研究区土壤积盐作用的加强,次生盐渍化的程度加重。

表5 不同景观类型的积盐量 (t/hm²)

年份 Year	灌溉景观 Irrigative landscape			非灌溉景观 Non-irrigative landscape			
	园地	耕地	人工林地	灌木林地	居民地	草地	盐碱地
	Orchard land	Crop land	Artificial forest	Shrubbery land	Residential area	Grass land	Saline alkali land
1983	25.78 ± 0.86Aa	23.40 ± 0.78Ba	21.42 ± 0.57Ca	23.91 ± 0.52Ba	21.44 ± 0.86Ca	27.14 ± 0.77Aa	26.35 ± 0.54Aa
1999	26.18 ± 0.82Aa	27.77 ± 0.64Bb	28.06 ± 0.63Bb	25.60 ± 0.49Cb	23.01 ± 0.80Db	28.22 ± 0.63ABa	28.02 ± 0.53Aa
2005	32.87 ± 0.83Ab	32.77 ± 0.73Ac	29.46 ± 0.68Bb	35.01 ± 0.52Cc	33.02 ± 0.85Ac	32.58 ± 0.67Ab	41.31 ± 0.55Db

表中数据均值 ± 标准差 (t/hm²) The data are means ± SD (t/hm²) ;LSD 差异形检验 ($P < 0.05$),同行间大写字母相同者,表示无显著差异性,字母不同者,表示有显著差异性 同列不同小写字母表示,有显著差异性,相同小写字母表示无显著差异性 In the same row, values with the same capital letter indicate no significant difference, the different capital letter means significant difference In the same column, values with the same small letter indicate no significant difference, the different small l letter means significant difference ($P < 0.05$, LSD-test)

2.5 区域水资源利用对地下水的影响

通过对研究区 23a 的水库输水量数据、地下水开采量数据、年降水量数据、年蒸发量数据与三口监测井 (N1,N2,N3) 地下水水位数据之间进行多因素 Pearson 相关性拟合检验 (表 6),水库输水量与地下水水位二者之间呈现极显著的负相关性 ($\alpha = 0.01$),并且与地表蒸发呈现显著负相关性 ($\alpha = 0.01$),表明区域灌水量的增加,促使地下水水位的抬升,由于地面蒸发的加剧,引起地面积盐作用的加强,从而造成区域单位面积积盐量的增加 (表 5)。从 1983 ~ 2005 年研究区地下水位年均抬升 0.09m,地下水矿化度年均升高 0.12 gL⁻¹,区域年均地下水开采量为 3.88 × 10⁶ m³,年均变幅不大,所占区域农田灌溉水资源利用的比例仅为 9.49%。区域维持农业正常生产的水资源主要来自于水库输水,水库输水量逐年增加,从 1983 年水库输水量的 2.68 × 10⁷ m³ 增加到 2005 年的 5.24 × 10⁷ m³,增加了 1.96 倍。区域水库输水量的加大,主要由于区域灌溉农田面积的扩大,从 1983 年到 2005 年间农田灌溉面积增加了 1487.94 hm²。由此可以看出区域水库输水灌溉是造成地下水水位抬升直接原因,在强烈的地面蒸发作用下,进而引发土壤盐渍化的加强。

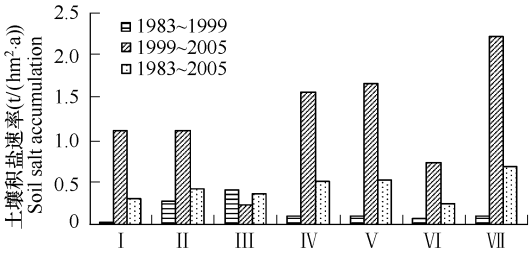


图4 不同景观积盐速率

Fig. 4 Rate of soil salt accumulation in different landscape types
I 园地 Orchard land ;II 耕地 Crop land ;III 人工林地 Artificial forest ;
IV 灌木林地 Shrubbery land ;V 居民地 Residential area ;VI 草地 Grass
land ;VII 盐碱地 Saline alkali land

表6 区域水资源与地下水水位之间的相关关系

Table 6 Correlation between water resources and groundwater table							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
X1	1	0.264	0.044	-0.472 *	-0.803 **	-0.832 **	-0.906 **
X2	0.264	1	0.175	-0.032	0.038	-0.024	-0.130
X3	0.044	0.175	1	-0.486 *	0.043	-0.102	-0.034
X4	-0.472 *	-0.032	-0.486 *	1	0.144	0.185	0.426 *
X5	-0.803 **	0.038	0.043	0.144	1	0.858 **	0.849 **
X6	-0.832 **	-0.024	-0.102	0.185	0.858 **	1	0.831 **
X7	-0.906 **	-0.130	-0.034	0.426 *	0.849 **	0.831 **	1

* Correlation is significant at the 0.05 level ; * * Correlation is significant at the 0.01 level

X1 为水库输水量 X1 means water consumption from reservoir ;X2 为地下水开采量 X2 means water consumption from pumped groundwater ;X3 为年降水量 X3 means precipitation year⁻¹ ;X4 为年蒸发量 X4 means evaporating capacity year⁻¹ ;X5 为 N1 监测井地下水水位 X5 means the groundwater table in N1 monitoring well ;X6 为 N2 监测井地下水水位 X6 means the groundwater table in N2 monitoring well ;X7 为 N3 监测井地下水水位 X7 means the groundwater table in N3 monitoring well

3 结论与讨论

通过 1985 和 2000 两年的地下水位等值线图来反演 1983 年和 1999 年地下水位等值线图,从而使得土壤表层盐度资料与地下水水位资料进行配准,在统计分析 LSD 检验下,可信度达 99% 以上,并对 5 个时期各月地下水位水位的 LSD 检验,1983 年、1999 年和 2005 年区域地下水水位具有显著的差异性,地下水水位变动较大,年均抬升 0.09 m。

应用地统计学中的变异函数理论,对土壤表层的总盐进行地统计分析,3 个时段土壤总盐样点数值均符合正态分布,3 个时期的变异系数在 0.5 左右,具有中等变异强度,通过变异函数的理论模型最优拟合,符合指数模型,并且 F 检验达极显著水平 ($\alpha = 0.01$),采用 Kriging 进行空间数值的量化,得到土壤总盐空间分布图,在空间上能够很好的反映区域总盐的分布结构。

利用 GIS 技术对 3 个时期,同期地下水水位所引起的积盐区域与景观分布图的叠加运算,结果表明,随着地下水位的抬升作用不断加强,地表积盐区的面积不断扩大,地下水位每抬升 1m,造成区域地表积盐区要增加 144.45hm²。从 1983 年到 2005 年,23a 间无论是灌溉景观类型还是非灌溉景观类型,各景观类型的土壤表层单位积盐量的增加,并且具有显著的差异性 ($P < 0.05$),说明研究区次生盐渍化的程度加重。相关分析表明区域灌溉输水作用是地下水水位抬升的直接动因,由于地面蒸发的加剧,从而间接引发地表积盐区的扩大,造成单位面积积盐作用加强。

References :

[1] Guo Z R, Liu H T. Secondary salinification of soil and dynamic control of groundwater in irrigation area of inland basin, northwestern China. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21 (1) 45 — 48.

[2] Liu H, Zhong H P, Gu Y. Water resources development and oasis evolution in inland river basin of arid zone of northwest china. *Advance in Water Science*, 2001, 9 (4) 378 — 384.

[3] Kang E S, Li X, Zhang J S. Water resources relating to desertification in the Hexi area of Gansu Province, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 12 (6) :657 — 667.

[4] Gu F X, Zhang Y D, Pan X L, *et al.* Interaction of land usechange and spatial and temporal dynamics of soil moisture and salinity in arid land. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (6) 845 — 853.

[5] Zhao C Y, Wang Y C, Li B G. Coupling relationship between vegetation evolution and groundwater flow in internal continent river basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 12 :59 — 65.

[6] Jord n M M, Navarro-Pedre o J, Garc a-S nchez E, *et al.* Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions :geological and environmental implications. *Environmental Geology*, 2003, 45 (4) :448 — 456.

[7] Wei S Z, Wang D L, Li H Q. Study on models of exploitation and utilization of groundwater of the perimontane groundwater reservoir in the sangong river watershed, Xinjiang, China. *Arid Land Geography*, 2002, 25 (1) :115 — 120.

[8] Luo G P, Chen X, Zhou K F, *et al.* Temporal and spatial variation and the stability of the oasis in the Sangong River Watershed, Xinjiang, China. *Science in China (series D)*, 2003, 46 (1) 62 — 73.

[9] Ali K S, Yaman B. A dynamic model of salinization on irrigated lands. *Ecological Modeling*, 2001, 139 :177 — 199.

[10] Xin D H, Li W J. Integrated reclamation and development of the low production salinity area. Beijing :Beijing Agricultural University Press, 1990.

[11] Qiao Y H, Yu Z R. Sim ulation study on the effects of irrigation on soil salt and saline water exploration. *Acta Ecologica Sinica*, 2003,10 :2050 — 2056.

[12] Xiao M, An S Z. The water-salt attributes of the grassland soil-plant systems in arid region. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20 (6) 397 — 403.

[13] Liu G S. Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles. Beijing :Chinese Standard Press, 1996.

[14] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 9 (6) 651 — 657.

[15] Rossi R E, Mulla D J. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, 1992, 62 (1) 277 — 314.

[16] Figueira R, Sous A J, Pacheco A M, Catarinoa F. Saline variability at ground level after kriging data from *Ramalina* spp. *Biomonitoris. The Science of the Total Environment*, 1999, 232 :3 — 11.

[17] Wang Z Q. Geostatitics and Its Application in Ecology. Beijing :Chinese Science Press, 1999.

[8] Douaik A, Meirvenne M V, Tibor T. Soil salinity mapping using spatio-temporal kriging and Bayesian maximum entropy with interval soft data. *Geoderma*, 2005, 128 :234 — 248.

[9] Chang Y H, Scrimshaw M D, Emmerson R H C, Lester J N. Geostatistical analysis of sampling uncertainty at the Tollesbury Managed Retreat site in Black water Estuary, Essex, UK :Kriging and cokriging approach to minimize sampling density. *The Science of the Total Environment*, 1998, 221 :43 — 57.

[10] Goovaerts P. Geostatistics in soil science :state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 1999, 89 :1 — 45.

参考文献：

[1] 郭占荣,刘花台. 西北内陆灌区土壤次生盐渍化与地下水动态调控. *农业环境保护*,2002, 21 (1) :45 ~ 48.

[2] 刘恒,钟华平,顾颖. 西北干旱内陆河区水资源利用与绿洲演变规律研究. *水科学进展*,2001,12 (4) :378 ~ 384.

[3] 康尔泗, 李新, 张济世. 甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题. *冰川冻土*,2004,12 (6) :657 ~ 667.

[4] 顾峰雪,张远东,潘晓玲,等. 水盐动态与土地利用变化相互作用分析. *地理学报*, 2003,58 (6) :845 ~ 853.

[5] 赵成义,王玉朝,李保国. 内陆河流域植被变化与地下水运动的耦合关系. *水利学报*, 2003,12 :59 ~ 65.

[7] 魏守忠,王东亮,李洪庆,等. 三工河流域山前地下水库开发利用模型研究. *干旱区地理*,2002, 25 (1) :115 ~ 120.

[8] 罗格平,陈嘻,周可发. 三工河流域绿洲时空变异及其稳定性研究. *中国科学 (D 辑)*, 2002, 32 (6) :521 ~ 528.

[0] 辛德惠,李维炯. 浅层咸水型盐渍化低产地区综合治理与发展. 北京 北京农业大学出版社,1990.

[1] 乔玉辉,宇振荣. 灌溉对土壤盐分的影响及微咸水利用的模拟研究. *生态学报*,2003,10 :2050 ~ 2056.

[2] 肖明,安沙洲. 干旱区不同草地土壤植物系统水盐的特征. *植物生态学报*,1996, 20 (4) :397 ~ 403.

[3] 刘光菴. 土壤理化分析与剖面描述. 北京 中国标准出版社,1996.

[4] 李哈斌,王政权,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*,1998,9 (6) :651 ~ 657.

[7] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用. 北京 科学出版社,1999.