

内陆河流域中、下游绿洲耕地变化及其驱动因素 ——以石羊河流域中游凉州区和下游民勤绿洲为例

李小玉^{1, 2}, 肖笃宁^{1, 2}, 何兴元^{1*}, 陈 纬¹, 胡志斌¹, 宋冬梅³

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;
3. 中国石油大学地球资源与信息学院, 东营 257061)

摘要: 以野外实际调查资料以及社会经济统计资料, 结合研究区 1986 年和 2000 年的 TM 影像数据, 分析了石羊河流域中游凉州区和下游民勤绿洲近 20a 来的耕地变化及其驱动因子, 结果表明: (1) 两个绿洲的耕地面积都呈增加趋势, 且民勤绿洲耕地增加速度更为显著; 在空间上新增耕地主要集中在荒漠和绿洲的交错地带, 耕地的增加凉州区以沙地作为主要来源, 而民勤则以牺牲林草地为代价。 (2) 从耕地变化驱动力来看, 人口增加是直接动因, 同时农业科技进步和社会经济的发展为耕地面积的扩大提供了前提条件; 此外, 耕地面积的变化在凉州区与地表水量关系密切; 而在民勤则与大风、沙尘暴天气等生态环境问题以及绿洲内的降水、蒸发等气象因素有显著关系。充分表明石羊河流域中游绿洲经济的繁荣发展以下游民勤绿洲的急剧衰退为代价。

关键词: 绿洲; 耕地变化; 驱动因子; 石羊河流域; 水资源

文章编号: 1000-0933(2006)03-0671-10 中图分类号: Q149 文献标识码: A

Comparison on changes and their driving forces of farmland in oases of middle and lower reaches: The case of Liangzhou and Minqin oases in the Shiyang river basin

LI Xiao-Yu^{1,2}, XIAO Du-Ning^{1,2}, HE Xing-Yuan^{1*}, CHEN Wei¹, HU Zhi-Bin¹, SONG Dong-Mei³ (1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. College of Earth Resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 671~680.

Abstract: The development and utilization of water and land resources in the Shiyang river basin is the highest among the 3 inland rivers in the Hexi Corridor of Gansu province, northwestern China. Based on field investigation and social-economical data, in combination with TM images of the study area in 1986 and 2000, this paper analyzed the changes of farmland and their driving forces in Liangzhouqu and Minqin oases in the middle and lower reaches of Shiyang river basin in the last 20 years.

Farmland increased in both oases, while Minqin oasis increased more quickly. Most of the increased farmland was distributed on desert-oasis ecotones. But it was mainly converted from desert in Liangzhou oasis, and from woodland and grassland in Minqin oasis. In view of driving forces, the population increase was one of the most important factors, and improvement of agricultural technique and economic development provided conditions for farmland expansion in both oases. In addition, the expansion of farmland was closely related to the amount of surface water in Liangzhou oasis, but was effected by ecological environment such as gale and dust storm, and weather conditions such as rainfall and evaporation in Minqin oasis. With the development of human activities and expansion of farmland in Liangzhou oasis, the need for surface water is ever-growing from year to year, resulting in

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40501068; 40501073 和 90102004); 国家重点基础研究发展规划资助项目(973)(No. 2002CB111506)

收稿日期: 2005-08-12; **修订日期:** 2006-01-20

作者简介: 李小玉(1976~), 男, 甘肃人, 博士, 主要从事景观生态学和城市森林研究. E-mail: lixy76@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: hexy@iae.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40501068; No. 40501073 and No. 90102004); National Basic Research Program of China (973) (No. 2002CB111506)

Received date: 2005-08-12; **Accepted date:** 2006-01-20

Biography: LI Xiao-Yu, Ph. D., mainly engaged in landscape ecology and urban forest. E-mail: lixy76@163.com

a decrease of annual discharge to the Hongyashan reservoir from $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ during the 1950s and 1960s to only $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ so at present. Therefore overuse of groundwater in these regions, especially in the downstream Minqin oasis is very notable. All these indicated that the development of oases in the middle and lower reaches of Shiyang River had already lost the balance to a great extent, and the economic increase of Liangzhouqu oasis is at the cost of environment deterioration of Minqin oasis.

In order to realize rational resource utilization and sustainable development of Shiyang river basin, the surface water should be allotted at a reasonable proportion in the whole watershed, recovering the runoff in the lower reaches to 18% of the total runoff (about $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$) of Shiyang river, which used to be the level in early 1980s. In addition, the charge for transfer of water from other watersheds should be allocated according to the proportion of runoff utilization, and thus reduce the cost of water use in the lower reaches such as Minqin Oasis.

Key words: oasis; farmland changes; driving forces; Shiyang river basin; water resource

绿洲是干旱区独有的人文-自然景观,景观格局与水-生态过程成为干旱区景观生态研究的热点。在河西走廊的3个内流河流域中,石羊河流域的水、土资源开发程度最高,生态危机最大^[1]。尤其是近几十年,随着流域中游地区人口数量与经济规模的不断扩大,导致进入下游民勤绿洲的地表水资源日趋减少,引发了绿洲萎缩、土地沙漠化以及水资源供需矛盾突出和地下水位下降等一系列社会经济问题^[2-4]。耕地作为干旱区绿洲土地中的精华,其动态变化无疑是影响地区可持续发展的关键问题,不适当的开荒和盲目扩大耕地面积,可导致水土资源利用的不合理和不平衡,甚至引起生态环境的恶性循环^[5,6]。因此,对石羊河流域中下游绿洲耕地的时空变化及其驱动因子进行定量分析研究,不仅有助于深入了解干旱区内陆河流域耕地变化与自然、生态过程和人类社会活动之间的关系,也有利于确定人类的各种经济活动导致该地区景观改变的强度和方向及其有效性,从而为本区域可持续发展提供重要的科学依据。

1 研究区概况

石羊河流域是河西走廊三大内陆河流域之一,流域总面积 $4.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于 $101^{\circ}41' \sim 104^{\circ}16'E$, $36^{\circ}29' \sim 39^{\circ}27'N$ 之间。水系在上游山区有8条主要河流,它们出山以后进入永昌—武威盆地,水量大部分被农业引灌和下渗转化为地下水,在洪积扇边缘地带又以泉水的形式溢出地表,形成众多的泉水河道,再次汇合成为石羊河,此段是石羊河的中游;此后向北穿越红崖山进入民勤盆地,水流经引灌而耗于蒸发,逐渐消失。

该流域属干旱的大陆性内陆气候区域,具有降水量少、降水变率大、年内分配不均、蒸发量大和干旱时段明显等特点。本文选取该流域中下游的典型农业绿洲——凉州区和民勤绿洲作为研究区域,海拔在1400~2100 m之间,降水量和蒸发量凉州区分别为158 mm和1963 mm,民勤分别为115 mm和2637 mm;土壤主要有灰钙土、灰漠土、绿洲灌淤土、草甸土、盐土、风沙土等类型。

2 研究方法和数据

本文根据研究区20a来的土地详查资料分析两个绿洲耕地面积的时间变化,并利用1986年和2000年的TM影像数据的人工目视解译结果分析了其在空间上的转移变化情况;在此基础上,应用主成分分析方法对两个绿洲耕地变化的驱动机制进行了比较分析,为石羊河流域水土资源的合理配置提供理论依据。

数据来源主要由自然社会经济统计数据和空间数据两部分组成。自然社会经济统计资料主要是武威地区1980~2000年的土地利用详查资料以及凉州区和民勤县1980~2000年的社会经济统计年鉴;空间数据为1986年和2000年的凉州区和民勤绿洲的TM影像数据,通过人工目视解译,根据绿洲的土地利用特征和实际情况,把研究区土地利用划分为耕地、林地、草地、居民地、沙地和盐碱地6个类型。

3 耕地变化定量分析

根据武威地区土地变更详查资料,从近20a来两个绿洲的耕地面积变化情况(图1)来看,中游凉州区耕地面积呈持续增加趋势,从1980年的 $11.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到2000年的 $11.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$,净增耕地面积4900 hm^2 ,年均相对增加率为0.21%;但随着其人口的不断增加(20a来增加 23.08×10^4 人,年均相对增加率为1.52%),使

得人均耕地面积从1980年的 0.149 hm^2 降低到2000年的 0.119 hm^2 。下游民勤绿洲近年来的耕地增加速度更为显著,从1980年的 $6.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到了2000年的 $8.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$,净增 $2.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$,年均相对增加率高达1.45%;因而使得在其人口增加了 6.27×10^4 人(年均相对增加率为1.30%)的情况下,人均耕地面积仍然维持稳定(1980年为 0.283 hm^2 ,到2000年仍为 0.289 hm^2)。

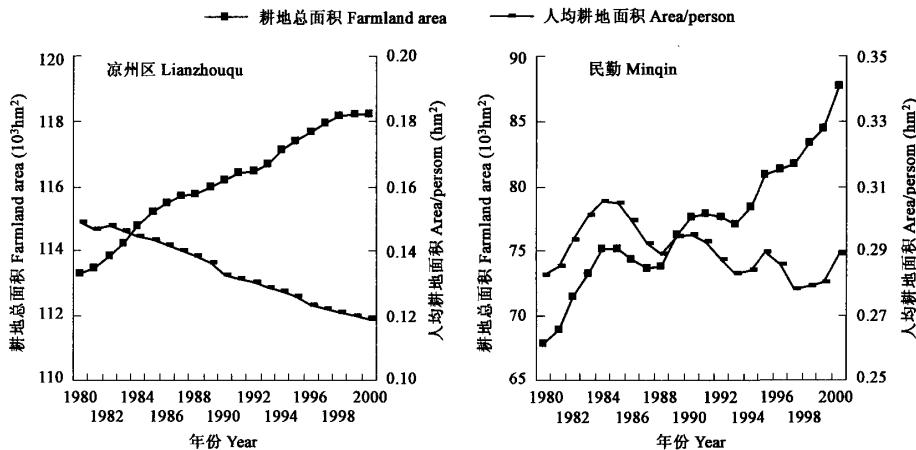


图1 凉州区和民勤绿洲耕地总面积和人均耕地面积

Fig. 1 Total area and mean area per person of farmland in Liangzhou and Minqin oases

3.2 空间变化分析

分别根据1986和2000年凉州区和民勤绿洲的TM影像人工目视解译结果,计算了两个绿洲不同时期的耕地面积及其空间转移变化情况(图2,表1、表2)。首先需要说明的一点是,根据影像解译计算得出的两个绿洲耕地面积都要比土地详查数据大许多,这主要是由于土地详查面积是根据历年的上报登记面积为主,而很少包括农民自行开垦的一些井灌面积和撂荒地的复垦,尽管这样,但土地详查面积仍可较好地反映当地耕地增加的趋势(图1),因此本文仍采用该数据进行驱动力分析。

通过图2和表1可以看出,近15a来凉州区耕地来自其它各土地利用类型的面积为 15501.9 hm^2 ,而同期从耕地转化为其它土地类型的面积为 9245.1 hm^2 ,净增耕地面积 6301.8 hm^2 ,其中 6146.1 hm^2 来自沙地,表明凉州区耕地的增加主要以改造沙地为主要来源。在空间上新增耕地主要分布在凉州区绿洲东部的纯井灌区,有大面积的沙地和部分林草地被开垦为耕地。

表1 凉州区绿洲耕地面积变化情况

Table 1 Spatial changes of farmland area in Liangzhouqu oasis

项目 Item	林地 Forest land	草地 Grassland	居民地 Residential area	沙地 Sandy land	盐碱地 Salinized land	合计 Total
来自其它各类型的耕地面积(hm^2) Area of farmland come from the other types	2040.5	3930.3	730.9	8800.2	—	15501.9
转为其它各类型的耕地面积(hm^2) Area of farmland converted into the other types	894.4	3132.4	2564.2	2654.1	—	9245.1
来自各类型的净增耕地面积(hm^2) Net increment of farmland come from other types	+1191.1	+797.9	-1833.3	+6146.1	—	+6301.8
未变化面积 Unchanged area of farmland(hm^2)	144820.9					
相对变化率 Relative rate of farmland changes(%)	4.09					
1986年面积 Farmland area in 1986*(hm^2)	154021.0(115498.0)					
2000年面积 Farmland area in 2000*(hm^2)	160322.8(118209.5)					

* 1986 和 2000 年面积栏括号中为土地详查数据 The area of 1986 and 2000 in parenthesis was come from investigation of land resource by local authorities; 下同 the same below

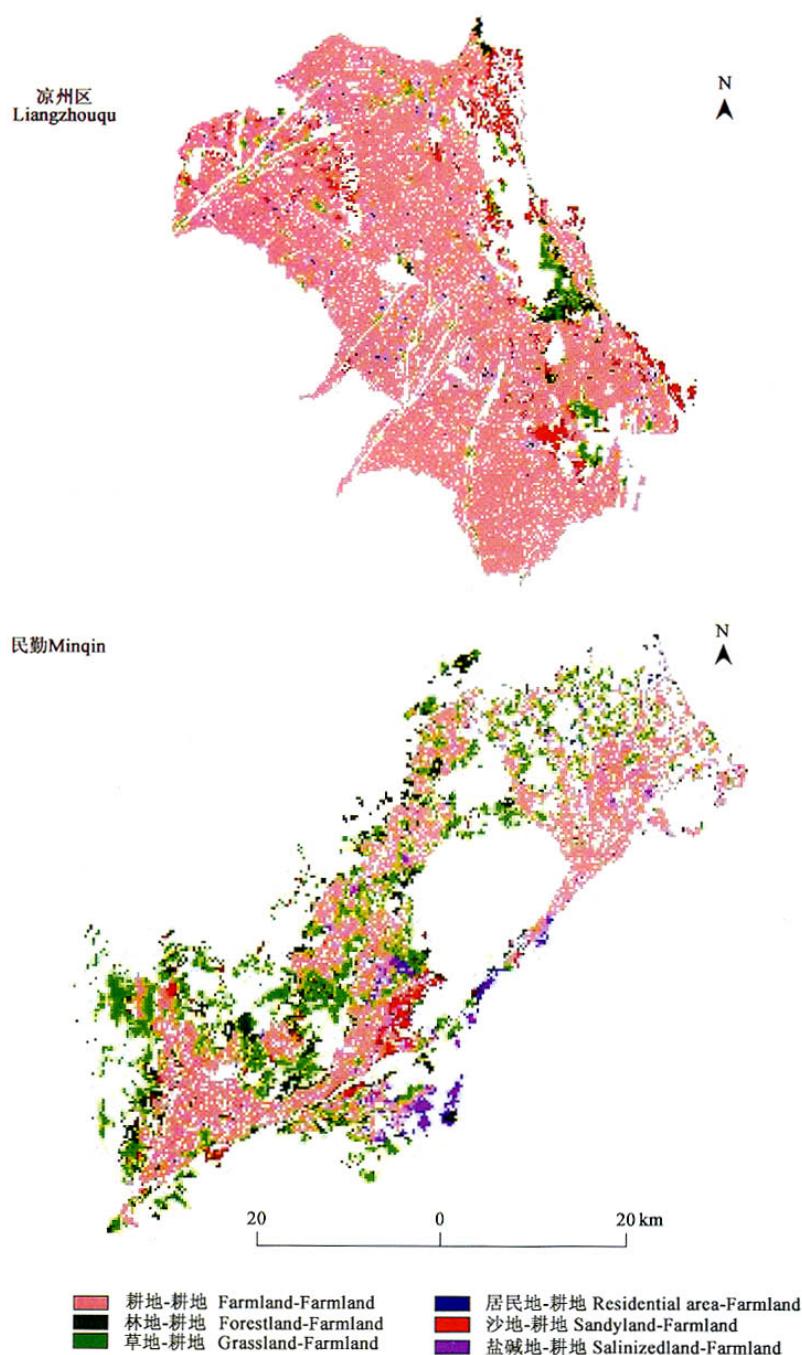


图2 凉州区和民勤绿洲各土地类型向耕地转化的空间分布图
Fig. 2 Distribution of increased farmland from other land use types in Liangzhouqu and Minqin oases

在民勤绿洲(表2),耕地面积增加了36 434.3 hm²,新增耕地面积达1986年耕地总面积的52.61%,其中来自草地和林地的分别为20 506.8 hm²和8 110.4 hm²,各占新增耕地面积的56.3%和22.3%。可见,民勤绿洲耕地的增加是以牺牲林草地为代价。空间分布上则表现为对原有耕地外围林草地的开垦,尤以水资源比较充足的民勤绿洲西南部河井混灌区最为突出。此外,尽管民勤湖区生态环境的恶化已经严重威胁到了当地居民的正常生产和生活,但近年来湖区破坏林草地开垦耕地的现象仍十分严重,新增耕地面积有14.76%(4 943.6 hm²)来自草地,4.32%(1 447.0 hm²)来自林地,从而使得林地和草地面积分别减少1 520.5 hm²和4941.3 hm²;耕地的大量增加导致了湖区淡水资源的严重紧缺,使得地下水超采严重,导致矿化度本身很高的湖区地下水水质恶化趋势加剧,大面积耕地被迫弃耕,近年来实际播种耕地面积仅有耕地总面积的1/3左右,造成了生态环境的不断恶化^[7,8]。

表2 民勤绿洲耕地面积变化情况

Table 2 Spatial changes of farmland area in Minqin oasis

项目 Item	林地 Forest land	草地 Grassland	居民地 Residential area	沙地 Sandy land	盐碱地 Salinized land	合计 Total
来自其它各类型的耕地面积(hm ²) Area of farmland come from the other types	8608.0	22307.9	237.0	4809.2	4494.6	40456.7
转为其它各类型的耕地面积(hm ²) Area of farmland converted into the other types	497.6	1801.2	515.1	933.8	274.8	4022.4
来自各类型的净增耕地面积(hm ²) Net increment of Farmland come from other types	+ 8110.4	+ 20506.8	- 278.1	+ 3875.5	+ 4219.8	+ 36434.3
未变化面积 Unchanged area of farmland(hm ²)	65225.6					
相对变化率 Relative rate of farmland changes(%)	52.61					
1986年面积 Farmland area in 1986(hm ²)	69248.0(74333.3)					
2000年面积 Farmland area in 2000(hm ²)	105682.3(87631.5)					

由上分析可以看出,耕地的增加主要集中在荒漠和绿洲的交错地带,民勤绿洲耕地增加速度明显大于凉州区。中游凉州区绿洲耕地的增加以沙地作为主要来源,而下游民勤绿洲耕地的增加则以牺牲林草地为代价。

4 绿洲耕地变化的驱动力分析

4.1 耕地变化影响因子的选择与分析

石羊河流域中下游景观格局演变特征主要是荒漠化景观和绿洲化景观逐渐分异,其根本原因是由于干旱区气候这一最基本和最长久的自然因素所造成,但有限的水资源数量和分布状况,以及人类社会不断加强的生产活动已成为促进本地区景观变化的最活跃力量^[9,10]。为了定量分析各影响因子对耕地景观变化的作用与贡献,并比较中下游绿洲耕地变化驱动因子的异同,根据统计分析的思路和要求,结合研究区的现有资料情况,首先选择尽量多的可能影响因素,通过统计分析提取主成分,分别对两个绿洲景观变化的影响因素进行归纳和比较。为了尽可能全面地反映研究区景观变化的影响因素,本研究根据实地考察分析,并在综合已有研究成果和专家意见的基础上,选择了以下几个方面共17个指标:

耕地和人口 耕地面积(Y),人口数量(X_1);

水资源利用 地表水量(X_2),机井数量(X_3),农村用电量(X_{10})(凉州区和民勤绿洲分别各有80%和90%以上的农村用电量用于机电井灌溉);

农业种植情况 粮食总产量(X_4),人均粮食产量(X_5),粮食作物种植比例(X_6),经济作物种植比例(X_7);

农业现代化情况 化肥用量(X_8),农业机械总动力(X_9);

社会经济指标 工业总产值(X_{11}),农业总产值(X_{12}),农村经济收入、费用比(X_{13});

气象指标 降雨量(X_{14}),蒸发量(X_{15}),大风日数(X_{16}),无霜日数(X_{17})。

以上述17个指标和耕地面积的1980~2000年取值作为原始分析样本,使用统计分析软件SPSS11.0进行分析计算,分别得出凉州区和民勤绿洲耕地变化驱动因子的相关系数矩阵、特征值、主成分贡献率与累计贡献

率以及主成分荷载矩阵(表3~表6)。

从表3、表4可以看出,各指标之间存在着很大的相关性。在凉州区绿洲,相关系数高于0.85的指标组合占所有组合的28%,其中耕地面积Y与除地表水和气象因素之外的其它各因子都存在较大的相关性,同时, X_1 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 与 X_8 、 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 等指标之间都彼此存在较大相关;而在民勤绿洲,相关系数高于0.85的指标组合达30%,其中Y、 X_1 、 X_2 以及 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 等指标都与其它多个指标之间存在较大相关性。同时还发现气象因子在两个绿洲中都与其它影响因素相关性较低。因此,为了定量地确定各因子的贡献及其相互关系,有必要对这些影响因子进行主成分分析。

表3 凉州区绿洲耕地变化驱动力变量相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix of driving force variables of farmland changes in Liangzhou oasis

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	
Y	1.00																	
X_1	0.98	1.00																
X_2	0.12	0.11	1.00															
X_3	0.98	0.93	0.12	1.00														
X_4	0.87	0.89	0.12	0.89	1.00													
X_5	0.41	0.42	0.10	0.52	0.79	1.00												
X_6	-0.94	-0.97	-0.19	-0.89	-0.90	-0.47	1.00											
X_7	0.84	0.80	0.32	0.76	0.52	-0.01	-0.76	1.00										
X_8	0.85	0.88	0.12	0.83	0.89	0.60	-0.91	0.60	1.00									
X_9	0.89	0.92	0.08	0.88	0.94	0.61	-0.92	0.57	0.85	1.00								
X_{10}	0.97	0.98	0.13	0.93	0.86	0.391	-0.94	0.80	0.81	0.90	1.00							
X_{11}	0.82	0.87	0.03	0.82	0.94	0.68	-0.89	0.46	0.85	0.98	0.86	1.00						
X_{12}	0.94	0.97	0.07	0.91	0.94	0.56	-0.96	0.68	0.90	0.97	0.95	0.96	1.00					
X_{13}	0.27	0.13	0.22	0.44	0.36	0.56	-0.15	0.06	0.20	0.22	0.14	0.19	0.18	1.00				
X_{14}	0.35	0.30	0.42	0.34	0.251	0.12	-0.33	0.51	0.28	0.23	0.27	0.17	0.28	0.15	1.00			
X_{15}	-0.59	-0.56	-0.60	-0.59	-0.50	-0.25	0.54	-0.66	-0.45	-0.44	-0.62	-0.40	-0.51	-0.21	-0.60	1.00		
X_{16}	-0.68	-0.66	-0.15	-0.62	-0.45	-0.02	0.61	-0.74	-0.45	-0.49	-0.62	-0.42	-0.57	-0.26	-0.13	0.40	1.00	
X_{17}	-0.43	-0.39	0.08	-0.39	-0.24	0.05	0.43	-0.49	-0.33	-0.33	-0.36	-0.27	-0.36	0.03	-0.05	-0.01	0.38	1.00

Y , 耕地面积 Farmland area; X_1 , 人口数量 Population; X_2 , 地表水量 Amount of surface runoff; X_3 , 机井数量 Number of pumped wells; X_4 , 粮食总产量 Total crop production; X_5 , 人均粮食产量 Mean crop production per person; X_6 , 粮食作物种植比例 Percent of planted grain crop; X_7 , 经济作物种植比例 Percent of planted cash crop; X_8 , 化肥用量 Amount of fertilizer application; X_9 , 农业机械总动力 Total power of agricultural machine; X_{10} , 农村用电量 electric power used in agriculture; X_{11} , 工业总产值 Total product of industry; X_{12} , 农业总产值 Total product of agriculture; X_{13} , 农村经济收入、费用比 Ratio of income to expenses in rural; X_{14} , 降雨量 precipitation; X_{15} , 蒸发量 evaporation; X_{16} , 大风日数 Number of gale days; X_{17} , 无霜日数 Frost-free days, 下同 the same below

主成分分析表明(表5),凉州区和民勤绿洲分别各有3个特征值大于1,累计贡献率分别达82.13%和84.97%,因此两个研究区分别都可以提取3个主成分。通过对各主成分进行荷载矩阵分析(表6),可分别得到各影响因子在各主成分中所占据的相对重要性。

在凉州区,第一主成分与 X_1 、 X_3 、 X_4 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 有较大的正相关,与 X_6 呈明显负相关;第二主成分与 X_2 呈较大正相关,与 X_{15} 呈负相关;第三主成分与 X_5 呈较大正相关。因此,凉州区绿洲耕地变化驱动因素可以概括为以下3个方面:(1)社会经济和农业科技进步因素;(2)绿洲水资源利用;(3)绿洲人口承载力。

在民勤绿洲,第一主成分也同样与 X_1 、 X_3 、 X_4 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 有较大的正相关;第二主成分与 X_{16} 呈负相关;第三主成分与 X_{14} 呈较大正相关,与 X_{15} 呈负相关。同样,民勤绿洲耕地变化驱动因素也可以归纳为以下3个方面:(1)社会经济和农业科技进步因素以及水资源状况;(2)沙尘暴天气等生态环境问题;(3)绿洲内的降水、蒸发等气象因素。

4.2 凉州区绿洲耕地变化驱动因素分析

4.2.1 社会经济和农业科技进步因素 第一主成分包含了55.20%的变化率,是主控因子。人口作为一种持续的外界压力,与凉州区耕地变化有着极为密切的关系,相关系数达0.98,可以认为,人口增长是促进耕地面积增加的最主要驱动力之一。虽然耕地面积不断增加,但随着人口的增长,人均耕地面积在凉州区仍呈持续

下降趋势。因此,在耕地面积受到水资源等因素严重制约的条件下,提高耕地生产力已成为当地谋求发展的重要手段。

表4 民勤绿洲耕地变化驱动力变量相关系数矩阵

Table 4 Correlation matrix of driving force variables of farmland changes in Minqin oasis

Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	
Y	1.00																	
X_1	0.95	1.00																
X_2	-0.85	-0.89	1.00															
X_3	0.79	0.87	-0.75	1.00														
X_4	0.91	0.96	-0.87	0.75	1.00													
X_5	0.77	0.82	-0.76	0.52	0.94	1.00												
X_6	-0.89	-0.83	0.69	-0.68	-0.79	-0.68	1.00											
X_7	0.88	0.86	-0.71	0.67	0.83	0.72	-0.97	1.00										
X_8	0.93	0.98	-0.83	0.88	0.92	0.75	-0.81	0.85	1.00									
X_9	0.92	0.98	-0.87	0.93	0.92	0.74	-0.78	0.79	0.98	1.00								
X_{10}	0.93	0.95	-0.90	0.78	0.94	0.82	-0.77	0.78	0.91	0.92	1.00							
X_{11}	0.92	0.96	-0.84	0.91	0.90	0.73	-0.77	0.77	0.96	0.98	0.89	1.00						
X_{12}	0.95	0.99	-0.88	0.87	0.96	0.82	-0.82	0.83	0.97	0.98	0.95	0.98	1.00					
X_{13}	-0.19	-0.42	0.42	-0.31	-0.38	-0.28	0.02	-0.16	-0.42	-0.45	-0.32	-0.41	-0.38	1.00				
X_{14}	0.38	0.31	-0.24	0.31	0.19	0.05	-0.60	0.53	0.30	0.26	0.26	0.24	0.27	0.12	1.00			
X_{15}	-0.16	-0.09	-0.05	-0.07	-0.09	-0.10	0.33	-0.34	-0.13	-0.05	0.02	-0.04	-0.04	-0.21	-0.51	1.00		
X_{16}	-0.53	-0.52	0.46	-0.15	-0.56	-0.57	0.47	-0.50	-0.47	-0.39	-0.56	-0.36	-0.47	0.09	-0.05	-0.03	1.00	
X_{17}	-0.58	-0.57	0.56	-0.33	-0.60	-0.59	0.41	-0.52	-0.59	-0.55	-0.52	-0.49	-0.52	0.39	0.01	0.18	0.47	1.00

表5 凉州区和民勤绿洲耕地变化影响因素主成分的特征值及贡献率

Table 5 Eigenvalues and contributing rate of primary factors

主成分 Principal component	凉州区绿洲 Liangzhouqu oasis			民勤绿洲 Minqin oasis		
	特征值 Eigenvalues	贡献率(%) % of Variance	累计贡献率(%) Cumulative	特征值 Eigenvalues	贡献率(%) % of Variance	累计贡献率(%) Cumulative
1	9.39	55.20	55.20	8.80	51.74	51.74
2	2.72	16.02	71.23	3.4367	20.40	72.13
3	1.85	10.90	82.13	2.1832	12.84	84.97

表6 凉州区和民勤绿洲耕地变化影响因素的主成分荷载矩阵

Table 6 The matrices of primary factor loadings

	凉州区绿洲 Liangzhouqu oasis			民勤绿洲 Minqin oasis		
	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3
X_1	0.96	0.23	-0.11	0.89	0.43	0.12
X_2	-0.05	0.81	0.17	-0.81	-0.41	0.09
X_3	0.91	0.29	0.05	0.96	-0.02	0.10
X_4	0.93	0.13	0.32	0.80	0.57	0.08
X_5	0.56	-0.02	0.78	0.58	0.70	0.03
X_6	-0.95	-0.24	0.06	-0.67	-0.40	-0.57
X_7	0.64	0.58	-0.46	0.67	0.47	0.49
X_8	0.90	0.14	0.12	0.89	0.38	0.14
X_9	0.96	0.08	0.13	0.94	0.30	0.06
X_{10}	0.93	0.26	-0.11	0.82	0.49	0.07
X_{11}	0.94	-0.00	0.22	0.94	0.27	0.06
X_{12}	0.98	0.15	0.04	0.90	0.39	0.10
X_{13}	0.19	0.26	0.59	-0.54	-0.02	0.51
X_{14}	0.15	0.75	0.04	0.30	-0.13	0.82
X_{15}	-0.39	-0.81	-0.07	0.04	-0.07	-0.79
X_{16}	-0.58	-0.32	0.38	-0.13	-0.87	-0.04
X_{17}	-0.45	0.08	0.54	-0.35	-0.67	0.05

同时,第一主成分中化肥用量、农业机械总动力、农村用电量等反映农业科技进步的因子也都与耕地面积呈正相关,表明农业机械的广泛应用和农业耕作效率的不断提高,为耕地面积的扩大创造了有利的前提条件。此外,粮食作物种植比例与耕地面积有着较大的负相关,随着粮食作物种植比例的下降,科技含量更高的经济作物种植比例不断提高,从而在很大程度上提高了单位耕地面积的经济产出率,对于缓解由于人口持续增长造成的耕地压力具有一定的意义。

构成第一主成分的粮食总产量、工业总产值和农业总产值这3个因子,特别是农业总产值与耕地面积有着较大的相关性,说明凉州区耕地面积的增加在很大程度上推动了当地工农业经济的发展。另外,中游绿洲随着耕地面积的扩大,对地下水的开采强度也不断加强,组成第一主成分的机井数量和农村用电量(农村用电量的80%以上用于机井灌溉)与耕地面积呈高度正相关充分说明了这一点,凉州区20世纪70年代初开采量为 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,80年代初为 $4.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,到2000年则达到 $5.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,增幅显著。但另一方面,由于地下水的大量开采利用,超采现象日趋严重,使得绿洲地下水位下降明显。据计算,2000年中游凉州区地下水允许开采量为 $3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,当年超采 $2.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,水位下降0.6 m左右。近20a来凉州区绿洲大部分区域水位总降幅为5~11.5 m,有些区域高达16 m,下降速度为0.3~0.8 m/a,不仅造成了凉州区绿洲自身生态环境的破坏,同时使得河流向下游输送水量的重要组成部分——泉水资源几乎枯竭,由此直接造成了下游径流量的锐减,使得民勤绿洲由于水源严重不足,不得不超采地下水维持生计,形成了恶性循环^[10]。

4.2.2 绿洲水资源利用 第二主成分包含了16.02%的变化率,与地表水量和蒸发量分别呈较高的正相关和负相关,主要体现为地表水资源的数量与利用以及绿洲气候的干旱程度。由于凉州区处于中游位置,有优先拦截利用地表水资源的地理优势,其境内三大水库近20a的年平均蓄水量为 $6.11 \times 10^8 \text{ m}^3$,占整个石羊河上游出山口径流的比例20世纪80年代平均为43.89%,90年代达到了50.16%。充分表明了当地耕地面积扩大对地表水资源的依赖程度,在地表来水较大的年份,耕地的开垦速度也随之增加。但同时也反映出了一个严峻的现实问题:由于中游耕地面积的扩大和工农业经济的发展,用水量不断增加,使得下游来水日益减少,中下游用水比例严重失调,下游径流量占出山口径流量的比例从50年代的37%下降到80年代的15%,以至于近几年的不足10%,直接造成了下游生态环境的不断恶化。

此外,凉州区绿洲境内蒸发量(1704~2028 mm)的变化也对耕地面积有着较大影响,在蒸发量大、气候干旱的年份,耕地开垦较少。

4.2.3 绿洲人口承载力 第三主成分包含了10.90%的变化率,构成第三主成分的是人均粮食产量,这一指标反映了绿洲的人口承载力。绿洲水土资源的承载压力随着人口的增加和人们生活水平的提高而不断增大,虽然耕地面积的不断扩大在很大程度上起到了缓解绿洲承载压力的作用,但也造成了该流域水资源的严重危机和中下游水资源利用的失衡,以及地下水过度开采等现象,直接导致了生态环境不断被破坏的恶性循环。因此,随着科学技术的不断进步,大力加强和提高农业生产水平,合理调整种植业结构,不断提高水土资源利用效率,也是提高绿洲人口承载水平的主要途径。

从以上分析可以看出,人口增长是促进耕地面积增加的最主要的驱动力之一,同时,农业科技的进步和推广以及地下水资源的大量开采为耕地面积的扩大提供了前提条件,而有限地表水资源则在很大程度上制约着耕地面积的不断扩大;但同时由于中游绿洲耕地的不断扩大和水资源使用量的持续增加,造成了下游民勤绿洲生态环境的急剧恶化,中、下游绿洲发展严重失衡,中游经济的繁荣以下游民勤绿洲的急剧衰退为代价。

4.3 民勤绿洲耕地变化驱动因素分析

4.3.1 社会经济和农业科技进步因素以及水资源状况 同凉州区绿洲一样,构成民勤绿洲耕地变化驱动因素的第一主成分包含了51.74%的变化率,占主导地位,仍然可以概括为社会经济和农业科技进步因素,只不过水资源因素在民勤绿洲也包含在第一主成分之中,而农业种植结构则没有被体现。

人口与民勤耕地变化的相关系数达0.95,同样也是耕地不断扩大的最主要因素。同时,第一主成分中化肥用量、农业机械总动力、农村用电量等反映农业科技进步的因素以及粮食总产量、工业总产值和农业总产值

等表明绿洲产出方面的指标也都与耕地面积呈正相关,与凉州区绿洲相同。

此外,构成第一主成分的地表水量与耕地面积呈显著负相关。这是由于尽管耕地面积不断扩大,但下游地表来水量却持续锐减,从20世纪50年代的超过 $5.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 到80年代的 $2.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,近几年仅有 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右。正是由于耕地的不断扩大,地表来水的持续减少,使得民勤绿洲由于水源严重不足,不得不超采地下水维持生计,这一点可以从组成第一主成分的机井数量和农村用电量(农村用电量的90%以上用于机井灌溉)与耕地面积呈高度正相关得到充分证明。民勤绿洲地下水开采量从20世纪70年代以前的不足 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,发展到70年代的 $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,80年代为 $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,到2000年则高达 $6.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,近20年来平均每年增加 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,形成了地下水位下降、矿化度增大、绿洲防护林大量死亡等生态环境质量持续下降的恶性循环^[11,12]。

通过绿洲景观类型图与同期地下水矿化度分布图的叠加运算表明,分布于地下水矿化度 1.5 g/L 以下的耕地面积减少了 $8\ 152 \text{ hm}^2$,而分布于 $1.5 \sim 2.0 \text{ g/L}$ 的面积增加了 $32\ 805 \text{ hm}^2$,主要是由于过度开采利用地下水使得其矿化度增加的结果。而地下水矿化度 3.0 g/L 以上的耕地面积从 $19\ 334 \text{ hm}^2$ (为绿洲总面积的7.03%)增加到了 $39\ 339 \text{ hm}^2$ (14.32%),其中 $>4.5 \text{ g/L}$ 的1987年仅有 337 hm^2 ,到了2001年则达到了 $11\ 042 \text{ hm}^2$ 。研究表明,当地下水矿化度高于 3.0 g/L 时小麦等粮食作物的生长就会受到较大影响,产量下降10%以上^[9],说明民勤绿洲,特别是湖区,地下水的矿化已严重威胁到了耕地的存在,湖区绝大部分耕地已无法种植粮食作物。按照作物灌溉定额为 $7\ 500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 计算,可估算出民勤绿洲每年因灌溉滞留在土壤耕作层的盐分数量,1987年为 $1.2 \times 10^7 \text{ t}$,2001年则达到 $20.7 \times 10^7 \text{ t}$,两个时期的平均滞盐量分别为 $16.7 \text{ t}/\text{hm}^2$ 和 $18.9 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。由于地下水矿化度的升高,使得耕地土壤盐渍化加剧,生产力大大降低,甚至被迫弃耕,直接影响到了民勤绿洲的存亡。

4.3.2 大风、沙尘暴天气等生态环境问题 与凉州区绿洲不同的是在民勤绿洲构成第二主成分(包含了20.40%的变化率)的大风日数,与耕地面积呈负相关。进一步表明了大风、沙尘暴天气等生态环境问题已经直接影响到了绿洲耕地的变化,这也充分说明了不断恶化的生态环境问题已经对下游民勤绿洲的发展构成了直接的威胁,不得不引起人们的高度重视和忧虑。

4.3.3 绿洲内的降水、蒸发等气象因素 第三主成分由降雨量和蒸发量构成,两者分别与耕地面积呈显著的正相关和负相关,解释了12.84%的变化率。变幅分别在50~200 mm的降水以及2 400~2 890 mm的蒸发量能够对耕地的变化产生影响,再一次证明民勤绿洲由于水资源的严重不足,生态环境已经变得相当脆弱,对水资源的依赖已非常敏感,甚至在湖区等地因降水和蒸发量的大小而发生耕地弃耕—复垦—弃耕的现象。

5 结果与讨论

(1)近20年来两个绿洲的耕地面积在数量上都呈增加趋势,且民勤绿洲耕地增加速度更为显著,据估算,如果按此趋势继续发展,下游民勤绿洲在未来15a中耕地面积还会大幅度增加近 $2.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。因此,必须建立科学合理的水土资源利用制度和中下游平衡发展模式,坚决规范混乱的水资源利用秩序,杜绝抢夺超采,以水定地,封井退耕,最大限度压缩耕地面积,努力提高耕地生产力和宝贵的水资源利用效率,及时纠正耕地的低水平盲目扩张,因地制宜还林还草(补种红柳、梭梭等超旱生植物等),或还其自然面貌,大力减少耕地用水量,增加生态环境用水,确保民勤绿洲的生态安全,这也是整个石羊河流域可持续发展的基本保障。同时,提高畜牧业比重,不仅可减少粮食作物耗水量,还可增加农业有机肥投入量,改善土壤质量,提高耕地生产力,避免农机化肥的过量投入,实现精耕细作,防止走石油农业的错误之路。

(2)从耕地变化驱动力来看,人口增加是直接动因,同时农业科技进步和社会经济的发展为耕地面积的扩大提供了前提条件,这一点在中下游绿洲都是一致的。凉州区绿洲由于处于中游,具有拦蓄利用地表水的地理优势,因而对地表水的依赖程度更高,耕地面积的变化与地表水量关系密切;可见,正是由于农业科技的进步和社会经济的不断发展,水利化程度的快速发展,河道渠网化和渠道衬砌标准提高,各河流的出山口的蓄、引水利工程大量建设,使得中游绿洲对水资源过量利用,直接造成了下游民勤绿洲由于地表水量日趋减少,对

地下水资源的依赖程度不断加大,生态环境恶化严重,生态系统更加脆弱,对外界因素的抵抗力不断降低,从而使得大风、沙尘暴天气等生态环境问题以及绿洲内的降水、蒸发等气象因素对耕地的变化都可产生显著的影响。该结论更进一步表明石羊河流域中、下游绿洲的发展已严重失衡,中游绿洲经济的繁荣以下游民勤绿洲的急剧衰退为代价。

(3)由于中游绿洲对水资源的过度利用,红崖山水库于2004年7月首次出现了干涸断流。为了保障下游绿洲生产和生态用水的基本需求,必须实现流域内部水资源的科学合理配置,做到统一管理,统筹调度,建议在民勤蔡旗或香家湾设立测水控制断面,以固定比例分水,逐步恢复下游来水量至20世纪80年代初期的水平(占总径流量的18%左右,约 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)。同时,对于外流域调水,有必要实行引水成本的全流域整体分担和以工补农等水价政策,以充分发挥引水工程的作用。

References:

- [1] Li S M, Chen G D, Li Y H, et al. Rational utilization of water resource and protection of ecological environment in the Hexi Corridor. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002. 76~249.
- [2] Wang Q, Shi J A, Chen G J, et al. Environmental effects induced by human activities in arid Shiyang River basin, Gansu Province, northwest China. Environmental Geology, 2002, 43(2): 219~227.
- [3] Li H L, Xiao D N, Wang Q B, et al. Landscape changes of typical agricultural oasis in arid regions and its driving factors. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(9): 1878~1883.
- [4] Song S B, Cai H J. Comprehensive quantitative assessment models for ecological environment in arid area. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2509~2515.
- [5] Tang Q C, Zhang J B. Water Resources and Eco-environment Protection in the Arid Regions in Northwest of China. Progress In Geography, 2001, 20(3): 227~233.
- [6] Wahap H, Hamid Y, Tashpulat T. Tendency and driving forces of cultivated land use change in Qira oases: the case of Oira oases in south of Tarim basin. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 608~614.
- [7] Du J Z. Investigating report about people's poverty in Huqu of Minqin. Gansu Agriculture, 2002, 10(1): 20~23.
- [8] Zou Y S, Wang Y S. Dynamic analysis of environment deterioration in lake area of Minqin by means of remote sensing and GIS. Journal of Lanzhou University(Natural science), 1999, 35(4): 109~116.
- [9] Song D M, Xiao D N, Zhang Z C, et al. Change of ecological security of Minqin oasis in Shiyang river basin. Journal of Desert Research, 2004, 24(3): 335~342.
- [10] Li X Y, Xiao D N. The dynamics of water resource and land use in oases of middle and lower reaches of Shiyang river watershed, Northwest China. Advances in water science, 2005, 16(5): 643~648.
- [11] Ma X W, Li B G, Wu C R, et al. Predicting of temporal-spatial change of ground-water table resulted from current land use in Minqin oasis. Advances in water science, 2003, 14(1): 85~90.
- [12] Ding H W, Wang G L, Huang X H. Runoff reduction into Hongyashan reservoir and analysis on water resources crisis of Minqin oasis. Journal of Desert Research, 2003, 23(1): 84~89.

参考文献:

- [1] 李世明,程国栋,李元红,等.河西走廊水资源合理利用与生态环境保护.郑州:黄河水利出版社,2002. 76~249.
- [2] 李华蕾,肖笃宁,王秋兵,等.干旱区典型农业绿洲的景观变化与原因分析.生态学报,2004, 24(9): 1878~1883.
- [3] 宋松柏,蔡焕杰.旱区生态环境质量的综合定量评价模型.生态学报,2004, 24(11): 2509~2515.
- [4] 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护.地理科学进展,2001, 20(3): 227~233.
- [5] 瓦哈甫·哈力克,海米提·依米提,塔西甫拉提·特依拜,等.绿洲耕地变化趋势及其驱动力分析——塔里木盆地南部策勒绿洲为例.地理学报,2004, 59(4): 608~614.
- [6] 杜景壮.关于民勤湖区群众贫困问题的调查报告.甘肃农业,2002, 10(1): 20~23.
- [7] 邹应双,王义祥.基于RS和GIS的民勤湖区环境恶化动态分析.兰州大学学报(自然科学版),1999, 35(4): 109~116.
- [8] 宋冬梅,肖笃宁,张志诚,等.石羊河下游民勤绿洲生态安全时空变化分析.中国沙漠,2004, 24(3): 335~342.
- [9] 李小玉,肖笃宁.石羊河流域中下游绿洲土地利用变化与水资源动态研究.水科学进展,2005, 16(5): 643~648.
- [10] 马兴旺,李保国,吴春荣,等.民勤绿洲现状土地利用模式影响下地下水位时空变化的预测.水科学进展,2003, 14(1): 85~90.
- [11] 丁宏伟,王贵玲,黄晓辉.红崖山水库径流量减少与民勤绿洲水资源危机分析.中国沙漠,2003, 23(1): 84~89.