

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.017

泾惠渠灌区作物种植结构变化对灌溉需水量的影响

张智韬¹ 粟晓玲¹ 党永仁² 向友珍¹ 崔晨凤¹ 田智²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省泾惠渠管理局, 三原 713800)

摘要: 研究种植结构变化对灌区作物需水量和灌溉需水量的影响, 能够为作物生育期的灌溉用水管理和农业水资源规划提供基础数据。依据泾惠渠灌区实测降水和蒸发蒸腾等气象数据, 采用 FAO 推荐的 Penman - Monteith 公式和作物系数法计算灌区主要作物需水量; 通过频率计算和配线法确定灌区丰水年(25%)、平水年(50%)和枯水年(75%)的有效降水量; 根据 1988—2014 年 Landsat 卫星遥感影像提取的泾惠渠灌区不同历史时期农业种植结构数据, 计算典型水文年份灌区总灌溉需水量, 并分析作物需水量和灌溉需水量在不同典型水文年的年际和月际变化。结果表明, 随着泾惠渠灌区农业种植结构的变化, 灌区总的作物需水量和灌溉需水量都呈现显著下降趋势。但泾惠渠灌区在 1988—2005 年间, 单位面积平均作物需水量和平均灌溉需水量都基本保持不变, 随后均呈小幅下降趋势。各月份作物总需水量和总灌溉需水量除 6 月份之外, 其余各月份都呈现显著下降趋势; 但在此期间, 灌区单位面积平均作物需水量和平均灌溉需水量除在 4、8、9 月份呈下降趋势, 而 6 月份呈显著增加趋势外, 其余各月份基本保持不变。灌区总的作物需水量和灌溉需水量的下降主要是由农作物种植面积大量减少所致, 种植结构的变化对其影响较小, 但灌区种植结构调整后的作物需水量状况更符合区域有效降水特点。

关键词: 灌溉需水量; 种植结构; 作物需水量; 遥感; 有效降水量

中图分类号: S274.1; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0122-09

Influence of Crop Planting Structure Change on Irrigation Water Requirement in Jinghuiqu Irrigation Area

Zhang Zhitao¹ Su Xiaoling¹ Dang Yongren² Xiang Youzhen¹ Cui Chenfeng¹ Tian Zhi²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. The Administration of Jinghuiqu Irrigation Area of Shaanxi Province, Sanyuan 713800, China)

Abstract: Researching the effect of crop planting structure change on alteration of crop water demand and irrigation water consumption would provide basic data for irrigation water management in the period of crop growing and agricultural water resources planning. Based on the meteorological data of actual precipitation and evapotranspiration collected in Jinghuiqu Irrigation Area, the irrigation water requirement of main crops was calculated by using Penman - Monteith formula and crop coefficient method recommended by FAO, and the effective precipitations of rainy year (25%), normal precipitation year (50%) and draught year (75%) were determined through frequency calculation and fitting curve method. Then the total irrigation water requirement in typical hydrologic years was calculated according to agricultural crop planting structure data in different periods extracted from remote sensing images in Jinghuiqu Irrigation Area from 1998 to 2014. The monthly and yearly change of water demand of crop and irrigation water requirement of typical hydrologic years were analyzed. The results showed that, in Jinghuiqu Irrigation Area from 1988 to 2014, with the change of agricultural planting structure

收稿日期: 2015-12-04 修回日期: 2016-03-06

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201301016)、国家自然科学基金项目(51409219、51409222)、中国博士后科学基金项目(2015M570856)和国家国际科技合作专项(2014DFG72150)

作者简介: 张智韬(1976—),男,副教授,博士,主要从事遥感技术在节水灌溉及水资源中的应用研究,E-mail: zhitaozhang@126.com

通信作者: 粟晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水资源优化配置和水量转化与水资源调控研究,E-mail: suxiaoling17@126.com

(the crop planting area was reduced by 63.5%, the orchard area was increased by more than 10.2 times, and the inhabitants area was increased by 1.63 times), the crop water demand and irrigation water requirement displayed a significant decrease. The total water demand was decreased from 780 million m^3 , 800 million m^3 and 820 million m^3 to 520 million m^3 , 530 million m^3 and 540 million m^3 , and the amount of irrigation water was dropped from 290 million m^3 , 350 million m^3 and 430 million m^3 to 190 million m^3 , 230 million m^3 and 270 million m^3 in three hydrologic years, respectively. Among different planting crops, the ratio of amount of irrigation water consumption of winter wheat and summer maize was dropped from over 90% to 50%, while that of the orchard was grown from less than 5% to 50%, and that of facilitated agriculture tended to increase slightly. However, the average crop water demand of unit area of three hydrologic years from 1988 to 2005 was remained around 720 mm, 700 mm and 685 mm, then it was decreased slightly, and later it was dropped to 700 mm, 685 mm and 670 mm in 2014, during which period the average irrigation water requirement almost equaled to the average crop water demand of unit area. With the change of planting structure from 1988 to 2014, the total irrigation water requirement and total crop water demand of unit area in each month, apart from June, showed a significant decreasing tendency, but the average irrigation water requirement and average crop water demand of unit area were decreased in April, August and September, increased in June and remained the same in other months. It indicated that the decrease of crop water demand and irrigation water requirement was caused mainly by decrease of crop area, and slightly by change of crop structure. The result also showed that the crop irrigation water requirement after adjusted crop planting structure was more in accordance with the features of regional effective precipitation.

Key words: irrigation water requirement; planting structure; crop water demand; remote sensing; effective precipitation

引言

灌溉需水量是指土壤原有储水量和有效降水量及地下水利用量不能满足作物蒸发蒸腾、冲洗盐碱以及其他方面要求而必须通过灌溉补充的水量^[1-2]。灌溉需水量是农业灌溉用水量的参考依据^[3-4]。目前灌溉仍然是保障粮食安全生产的重要手段,中国农田灌溉用水量约占全国总用水量的63%^[5],灌溉用水是灌区水资源消耗的主要途径。

农业灌溉需水量的计算与作物需水量、作物耕种面积、作物系数和气象因素等指标有关。作物灌溉需水量计算方法、时空分布特征及其影响因素长期以来备受关注^[6]。刘钰等^[7]选取小麦、玉米、棉花和水稻等4种作物,分析其作物需水量与净灌溉需水量的空间分布特征,提出旬有效降水量计算公式,并结合作物需水量绘制了中国主要作物灌溉需水量的空间分布图;刘玉春等^[8]采用降雨有效利用系数法估算有效降水量,进而计算了河北省不同水文年型(枯水年、平水年、丰水年)的棉花灌溉需水量;胡玮等^[9]采用相关系数法分析了气象因素对灌溉需水量的影响,并根据作物系数法计算华北地区冬小麦灌溉需水量,得出有效降水量对冬小麦灌溉需水量的影响是最显著的;黄仲冬等^[10]以华北平原

夏玉米为对象,研究了降雨和蒸散对灌溉需水量年际波动的贡献。王进鑫等^[11]研究陕西渭北旱塬苹果在不同降水年的需水量及需水规律,并根据有效降水量确定苹果灌溉需水量及灌溉策略。上述研究灌溉需水量主要采用作物需水量与有效降水量的差值获得,但灌区总的灌溉需水量还与灌区种植结构有关,特别是在不同典型水文年,由于种植结构的不同,各典型水文年内存在很大的差异,将直接影响农业灌溉用水管理。

自改革开放后,我国灌区农业种植结构发生了很大的变化,尤其是果园和设施农业等的种植面积迅速增长,使得灌区农业用水在时间和数量上都发生了很大的变化^[12-13],因此,研究种植结构变化对灌溉需水量的影响,对于了解灌区农业用水状况以及实现区域农业用水的预测具有积极的现实意义,可为灌区种植结构优化调整指明方向。但由于灌区种植结构历史数据的缺失或统计不准确,使得灌区总灌溉需水量的计算结果误差较大。利用历史遥感影像准确提取灌区种植结构,可以提高灌区灌溉需水量计算结果的精度。因此,本文以遥感影像提取的泾惠渠灌区不同历史时期种植结构数据为依据,根据灌区有效降水量和不同作物需水量,计算和分析灌溉需水量在不同水文年的年际和月际变化特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泾惠渠灌区位于北纬 $34^{\circ}25'20'' \sim 34^{\circ}41'40''$ 、东经 $108^{\circ}34'34'' \sim 109^{\circ}21'35''$ ，地处陕西省关中平原中部，北依仲山和黄土台塬，泾河、渭河和石川河三面环绕，引水枢纽在泾阳县西北的张家山泾河谷口，是一个从泾河自流引水的大(II)型灌区，为一典型的北方平原灌区。灌区范围涉及咸阳、西安和渭南三市的泾阳、三原、高陵、临潼、闫良和富平6个县区，灌区东西长约70 km，南北宽约35 km，地势西北高、东南低，地面坡降 $1/600 \sim 1/300$ ，排水条件良好。设施灌溉面积9.69万 hm^2 ，农田有效灌溉面积8.79万 hm^2 。灌区年平均降水量为535 mm，年平均蒸发量为1212 mm。灌区粮食作物以小麦和玉米为主，经济作物以蔬菜和果树为主，是陕西省重要的农副产品生产区之一^[14]。

1.2 遥感获取灌区历史作物种植结构方法

采用泾惠渠灌区1988—2014年Landsat5和Landsat8的分辨率为30 m的TM遥感图像，根据研究区各种农作物生长的物候历分析，经研究对比不同时相图像的光谱特征，确定1月上旬到3月上旬为冬小麦最佳判别时期，6月中旬到9月中旬为夏玉米、果园和设施农业等变化监测的适宜时相。由此，选取了7个典型年份，每个年份2个时相的卫星数据：数据获取时间分别为1988年1月23日和8月23日、1992年2月21日和7月17日、1995年3月2日和8月27日、2000年1月18日和9月1日、2004年2月16日和6月26日、2009年1月26日和6月30日、2014年2月25日和6月19日。根据不同时相图像的光谱特征，在地面实况资料专题图等辅助下，首先对遥感图像进行几何配准和辐射校正，采用分层分类法^[15]，提取农作物种植结构。并在计算机光谱分类基础上采用了交互式的目视解译和人工修正方法，从而大大提高了灌区土地利用信息提取精度。最后，以2004年同时期的高分辨率SPOT卫星数据和2014年高分1号卫星数据为基准，对提取结果进行了抽样检查，结果表明耕地提取的空间精度可达93%以上，面积精度达98%。

1.3 灌溉需水量计算方法

1.3.1 有效降水量

平原区降水过程中，一般认为被测试单元(或系统)侧向流进、流出的地下水水量相等，并且不考虑雨期地下水的补给(即潜水蒸发)量时，对旱地而言，有效降水量系指天然条件下，任一次降水过程中

降水入渗并能储存在根系吸水层内的水量^[16]。本研究采用的有效降水数据来源于泾惠渠灌区气象站1953—2014年实测降水数据及蒸发蒸腾等气象数据的计算结果。该值的计算式为

$$P_0 = P - R_s - D - P_e \quad (1)$$

$$\alpha_0 = \frac{P_0}{P} \quad (2)$$

$$P_e = \frac{\sum_{i=1}^n E_0 i}{T} t \quad (3)$$

式中 P_0 ——有效降水量, mm
 α_0 ——降水量有效利用系数
 P ——一次降水过程的总降水量, mm
 R_s ——地表径流量, mm
 D ——渗漏量, mm
 P_e ——降水期腾发量, mm
 E_0 ——降水过程中的日水面蒸发量, mm
 n ——降水过程日数
 T ——降水开始至结束总历时, h
 t ——降水过程中的净降水历时, h

1.3.2 灌溉需水量

灌区农业总灌溉需水量参照文献[17]的计算方法。计算式为

$$I_N = \frac{1}{1000} \sum (I_i A_i) \quad (4)$$

其中 $I_i = ET_c - P_0 \quad (5)$

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (6)$$

式中 I_N ——农业总灌溉需水量, 10^8 m^3
 I_i —— i 种作物全生育期灌溉需水量, mm
 A_i ——作物的种植面积, 万 hm^2
 ET_c ——作物蒸发蒸腾量, mm
 K_c ——作物系数, 由泾惠渠灌区相关试验数据得到

ET_0 ——参考作物蒸发蒸腾量, mm

根据气象资料, 采用FAO 56推荐的Penman-Monteith公式计算各站历年各月 ET_0 ^[18-19]。

2 结果与分析

2.1 泾惠渠灌区作物种植结构变化

在ERDAS9.1平台下, 采用分层分类方法, 分别对泾惠渠灌区1988—2014年历史遥感影像进行解译, 提取各土地利用类型, 结果如图1所示。其中, 果园是指果树园林等经济作物, 包括苹果、桃、葡萄等, 以及苗木花卉等经济园林; 居民地包括农村居民用地和城市用地, 以及道路交通等用地; 设施农业包括大棚蔬菜和季节性大棚蔬菜用地; 水域包括灌区

内河流、渠道、湖泊和水塘等用地。

利用 ArcGIS 9.3 软件对泾惠渠灌区不同历史

时期各土地利用类型的总面积进行统计^[20-22], 结果如表 1 所示。

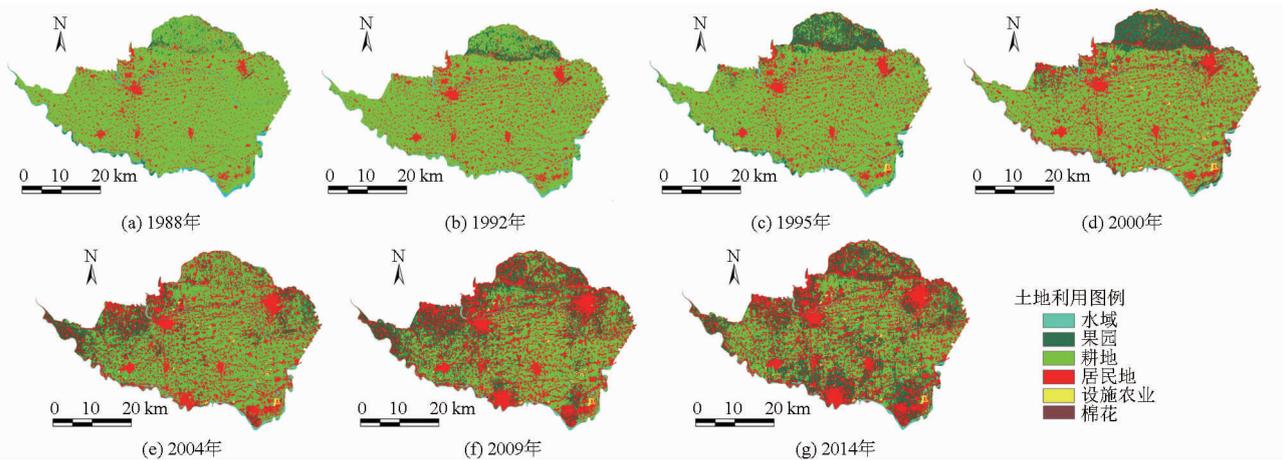


图 1 泾惠渠灌区 1988—2014 年土地利用图

Fig. 1 Land use map of Jinghuiqu Irrigation Area from 1988 to 2014

表 1 泾惠渠灌区不同时期农作物种植结构

Tab. 1 Crop planting structure of Jinghuiqu Irrigation Area at different periods

年份	水域	居民地	冬小麦	夏玉米	果园	设施农业	棉花	种植总面积
1988	2 349	22 376	110 152	110 063	3 685	0	330	114 167
1992	2 577	30 480	102 114	100 101	5 622	0	0	107 736
1995	2 572	33 538	98 516	89 933	12 606	206	0	111 328
2000	2 357	42 984	83 662	75 972	16 954	578	0	101 194
2004	2 495	54 361	66 711	64 178	17 136	615	0	84 462
2009	2 251	58 841	46 012	44 412	32 628	621	0	79 261
2014	2 272	58 864	40 218	39 513	37 487	632	0	78 337

根据不同年份泾惠渠灌区土地利用结构, 可以分析泾惠渠灌区土地利用的时空变化特征。由表 1 和图 1 可知, 泾惠渠灌区在 1988—2014 年间, 土地利用结构发生了显著的变化。由以大田粮食作物为主的种植模式, 变为粮食作物和经济果园并重的种植结构布局, 并大力发展设施农业。其中, 灌区在 1988—2014 年期间, 粮食作物的种植面积由 110 152 hm^2 缩小到 40 218 hm^2 , 减少的面积为 69 934 hm^2 , 减小了 63.5%; 果园种植面积由 3 685 hm^2 增加到 37 487 hm^2 , 增加的面积为 33 802 hm^2 , 是 1988 年果园种植面积的 10.2 倍; 设施农业的种植在 1995 年前后出现, 到 2014 年发展为 632 hm^2 ; 而棉花的种植面积在 1992 年以后几乎为零; 同时, 居民地的占地面积在 26 a 间有了大幅增加, 由 1988 年的 22 376 hm^2 增加到 2014 年的 58 864 hm^2 , 增加的

面积为 36 488 hm^2 , 为 1988 年的 1.63 倍。在 26 a 间, 泾惠渠灌区作物总种植面积有了大幅降低, 由 1988 年的 114 167 hm^2 缩小到 2014 年的 78 337 hm^2 , 减少的面积为 35 830 hm^2 , 减小了 31.4%。

2.2 泾惠渠灌区不同典型水文年有效降水量

根据 1953—2014 年泾惠灌区月平均降水量资料进行降水频率计算, 并以频率分别为 25% (丰水年)、50% (平水年) 和 75% (枯水年) 为标准选取设计典型年, 采用水文频率分析计算中的适线法 (配线法) 来分析泾惠渠灌区不同保证率的设计年降水量, 由计算结果分别选取 1996 年 (丰水年)、1999 年 (平水年) 和 1995 年 (枯水年) 为设计典型年, 并按式 (1) ~ (3) 计算有效降水量, 获得不同水文年有效降水量的年内各月份分配量, 结果如表 2 所示。

表 2 泾惠渠灌区不同典型水文年有效降水量

Tab. 2 Effective precipitation of Jinghuiqu Irrigation Area in different representative hydrologic years

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全生育期
水平年													
丰水年	5.4	0	19.2	21.6	44.0	72.9	53.5	72.2	83.8	45.3	7.9	0	425.8
平水年	0	0	17.1	37.8	106.3	37.7	71.3	38.2	42.6	30.1	10.5	0	391.6
枯水年	0	0	28.4	26.7	21.8	40.3	108.6	54.0	21.9	39.4	4.8	0	345.9

2.3 泾惠渠灌区作物系数及作物需水量

根据泾惠渠灌区多年实测资料,并结合主要作物的阶段需水量^[12,23-27]、日平均需水量和生长天

数,以及灌区的农业的耕作制度,得到灌区主要农作物各月作物系数及需水量如表3所示。

表3 泾惠渠灌区不同典型水文年全生育期作物系数及作物需水量

Tab.3 Crop coefficient and water demand of Jinghuiqu Irrigation Area in different representative hydrologic years

作物种类	水平年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全生育期
冬小麦	K_c	1.62	1.13	0.86	0.97	0.87					0.98	1.83	1.67	
	丰水年/mm	12.4	28.8	45.4	93.2	86.4					34.2	19.6	14.7	334.7
	平水年/mm	14.3	31.1	42.8	96.1	85.3					37.1	23.8	14.1	344.6
	枯水年/mm	13.7	30.6	40.8	99.9	96.2					34.2	22.1	17.6	355.1
夏玉米	K_c						0.4	0.9	1.1	1.7				
	丰水年/mm						30.3	113.7	113.0	92.5				349.5
	平水年/mm						33.3	116.7	113.5	96.1				359.6
	枯水年/mm						32.0	119.1	114.7	102.4				368.2
苹果	K_c	0.36	0.42	0.58	0.61	0.79	0.92	0.85	0.83	1.13	0.53	0.42	0.31	
	丰水年/mm	12.7	14.4	28.6	38.9	89.4	117.2	115.6	94.1	65.6	16.7	15.5	13.1	621.8
	平水年/mm	12.5	15.6	29.5	41.5	90.3	120.2	114.1	99.2	63.4	16.2	17.7	12.4	632.6
	枯水年/mm	13.4	17.3	31.2	39.5	92.3	119.7	118.9	95.6	66.5	18.1	19.7	15.4	647.6
棉花	K_c				0.65	0.51	0.63	1.07	1.47	1.71	1.74			
	丰水年/mm				41.8	48.5	74.9	161.0	183.4	112.0	55.0			676.6
	平水年/mm				51.1	51.4	80.9	145.7	186.3	123.2	57.9			696.5
	枯水年/mm				42.2	53.7	89.3	167.0	174.6	111.9	55.1			693.8
设施农业	K_c	0.63	1.07	1.27	1.51	0.63	1.07	1.27	1.51	0.63	1.07	1.27	1.51	
	丰水年/mm	87.2	196.3	261.4	241.9	87.2	196.3	261.4	241.9	87.2	196.3	261.4	241.9	2360.4
	平水年/mm	89.5	197.2	263.2	243.6	89.5	197.2	263.2	243.6	89.5	197.2	263.2	243.6	2380.5
	枯水年/mm	91.2	199.3	265.1	244.2	91.2	199.3	265.1	244.2	91.2	199.3	265.1	244.2	2399.4

注:设施农业以大棚黄瓜需水量为例进行计算,年需水量按3茬计算。

2.4 种植结构变化对灌区作物需水量的影响

2.4.1 灌区作物需水量的年际变化

根据泾惠渠灌区不同典型水文年全生育期作物需水量和提取的灌区历史种植结构数据,计算不同水文年灌区总的作物需水量。由于灌区总的作物需水量只能反映总体需水量趋势,不能反映种植结构变化对单位面积灌溉需水量的影响,所以,再根据农业总种植面积计算单位面积平均作物需水量。计算结果如图2所示,其中图2a~2c分别为丰水年、平水年和枯水年的灌区各作物及总的作物需水量变化趋势,图2d为不同典型水文年单位面积平均作物需水量的变化趋势。

由图2a~2c可以看出,泾惠渠灌区由1988—2014年总的作物需水量呈现下降趋势,在3种水文年总作物需水量分别由7.8亿 m^3 、8.0亿 m^3 、8.2亿 m^3 降到了5.2亿 m^3 、5.3亿 m^3 、5.4亿 m^3 ;其中冬小麦和夏玉米的作物需水量呈现显著下降趋势,从图中可以看出,冬小麦和夏玉米在1988年时,作物需水量占到总比重的90%以上,2014年时,占到总比重的50%左右,但在此变化过程中,果园需水量呈现迅速增加趋势,由1988年的不足5%增加到2014年

的50%左右,设施农业的需水量也逐渐增加,但增加幅度占总比重较小。丰、平、枯3种水文年的总作物需水量变化趋势基本一致。

由图2d可以看出,泾惠渠灌区在1988—2005年期间,单位面积平均作物需水量在丰、平、枯3种水文年基本保持在720、700、685 mm左右,在2005年时略有增加,随后呈现小幅下降趋势,到2014年时,单位面积平均作物需水量在3种水文年分别为700、685、670 mm。说明1988—2005年期间的作物种植结构变化对灌区总的平均作物需水量影响不大,2005—2014年的种植结构变化有利于减少灌区总的作物平均需水量。

结合表1和图2d可知,灌区总的作物需水量的大幅减少是一种假象,主要原因不是因为种植结构调整而减少的,而是由于农作物种植面积的大量减少引起的。

2.4.2 灌区作物需水量的月际变化

由于各月份作物需水量直接影响灌区的灌溉制度,根据灌区典型水文年各生育期作物需水量和种植结构数据,计算不同典型水文年灌区各月份的作物需水量。计算结果如图3所示。其中图3a~3c

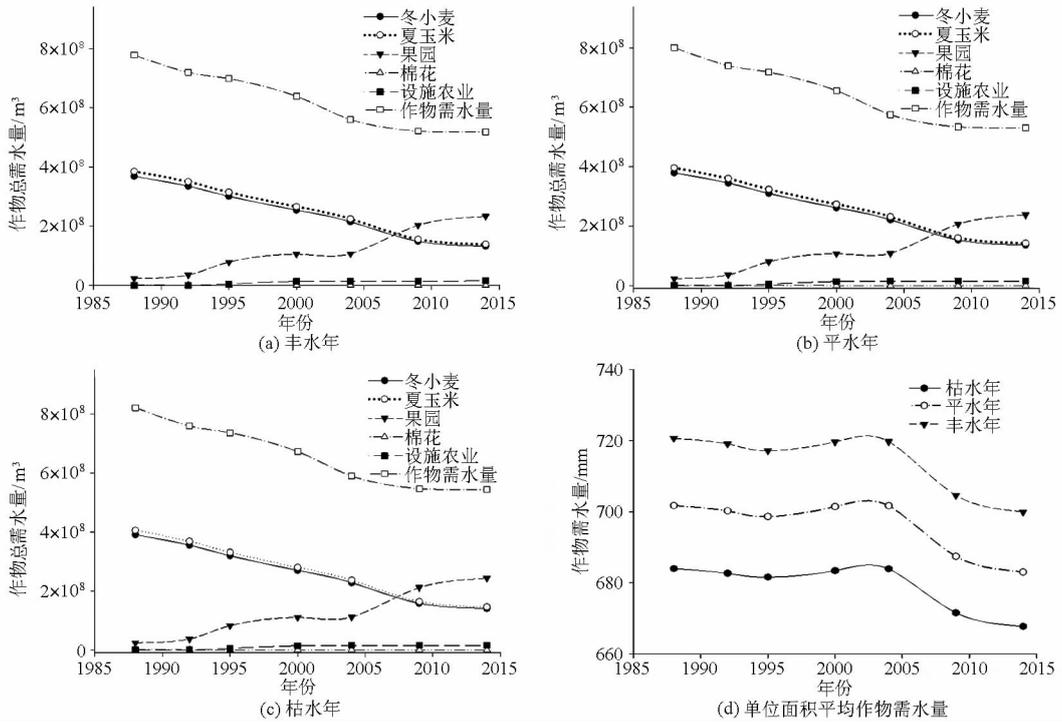


图 2 灌区不同典型水文年作物需水量及单位面积平均作物需水量的变化趋势

Fig. 2 Changing trend of total crop water demand and average unit of crop water demand of Jinghuiqu Irrigation Area in different representative hydrologic years

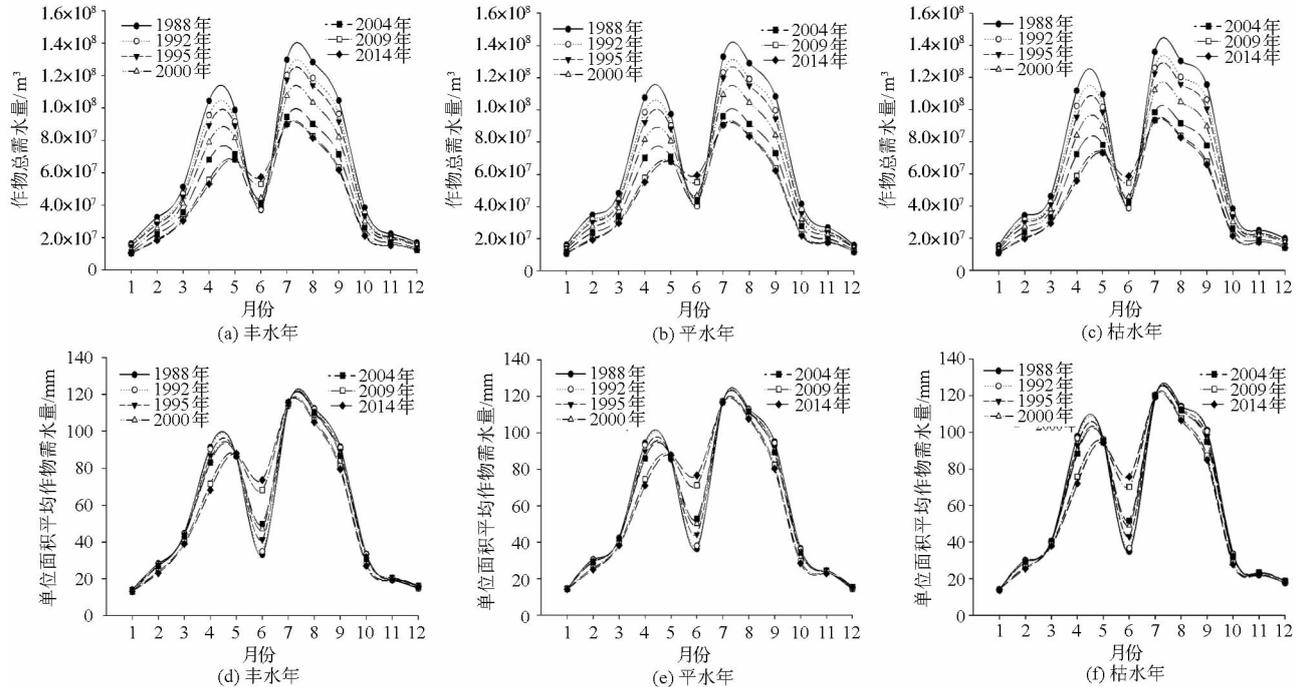


图 3 不同典型水文年灌区各月的作物总需水量和单位面积平均作物需水量

Fig. 3 Monthly crop water demands and average of unit crop water demands of Jinghuiqu Irrigation Area in different representative hydrologic years

分别为丰水年、平水年和枯水年的灌区各月份作物总需水量,图 3d~3f 分别为丰水年、平水年和枯水年灌区各月份单位面积平均作物需水量。

由图 3 可以看出,泾惠渠灌区 1988—2014 年各月作物总需水量和单位面积平均作物需水量都呈现双峰趋势,峰值区间分别出现在 4—5 月份

和 7—9 月份。根据泾惠渠灌区农作物生长特点,4—5 月份为冬小麦灌浆—成熟期,所以需水量较大,6 月份为冬小麦收获及夏玉米播种期,需水量较小,7—9 月份为夏玉米主要生育期,夏玉米属于高耗水作物,故此期间需水量较高。图 3 中的 3 种不同典型水文年的各月份作物需水量变化趋势基本一致。

从图 3a~3c 可以看出,随着灌区 1988—2014 年种植结构的变化,各月份作物总需水量除 6 月份之外,其余各月份的作物需水量都呈现显著下降趋势,特别是在高需水量的 4—5 月份和 7—9 月份,作物需水量下降最显著。但从图 3d~3f 可知,作物各月单位面积平均需水量在 1 月份、11—12 月份基本不变,在 4 月份有显著下降趋势,但 6 月份需水量明显增加,而且增加幅度大于 4 月份的下降幅度,其余月份中均有小幅减少趋势,但变化不是非常显著。说明种植结构变化对灌区 4 月份和 6 月份的作物需

水量影响较大,其余各月份影响较小。

2.5 种植结构变化对灌区灌溉需水量的影响

2.5.1 灌区灌溉需水量的年际变化

根据泾惠渠灌区不同典型水文年有效降水量及作物需水量,以及灌区种植结构数据,计算典型水文年灌区总的灌溉需水量,再根据农业总种植面积计算单位面积平均灌溉需水量。计算结果如图 4 所示,其中图 4a~4c 分别为丰水年、平水年和枯水年的灌区各作物及总灌溉需水量变化趋势,图 4d 为不同典型水文年单位面积平均灌溉需水量的变化趋势。

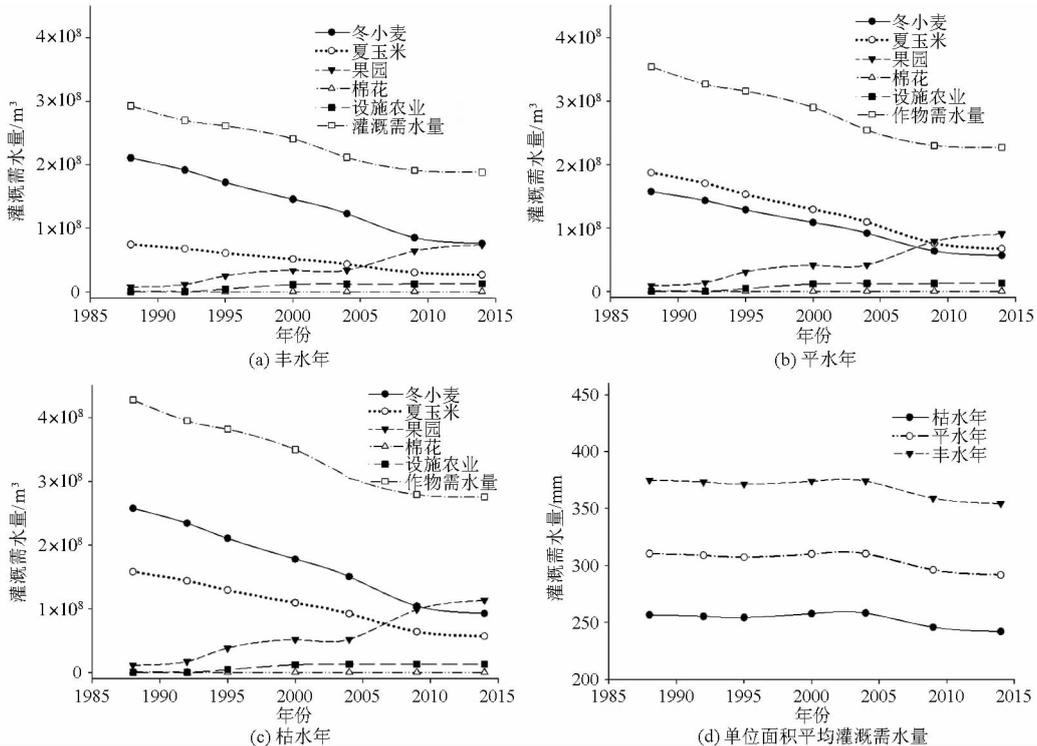


图 4 灌区不同典型水文年灌溉需水量及单位面积平均灌溉需水量的变化趋势

Fig. 4 Changing trend of total irrigation requirement and average of unit irrigation requirement of Jinghuiqu Irrigation Area in different representative hydrologic years

由图 4a~4c 可以看出,泾惠渠灌区 1988—2014 年总的灌溉需水量呈现下降趋势,在丰水年时,总灌溉需水量由 2.9 亿 m^3 降到了 1.9 亿 m^3 ;平水年时,总灌溉需水量由 3.5 亿 m^3 降到了 3.3 亿 m^3 ;枯水年时,总灌溉需水量由 4.3 亿 m^3 降到了 2.8 亿 m^3 ,其中冬小麦和夏玉米的灌溉需水量呈显著下降趋势。从图 4a~4c 还可以看出,冬小麦在 1988 年时灌溉需水量占到总比重的 70% 以上,2014 年时,所占总比重约 40% 左右;而冬小麦和夏玉米总灌溉需水量在 1988 年时占总比重约 95% 以上,到 2014 年时,所占总比重约 50% 左右。在此变化过程中,果园灌溉需水量呈迅速增加趋势,由 1988 年的不足 5% 增加到 2014 年的 50% 左右,设施农业的灌溉需水量也呈增加趋势,但增加幅度占比较小。3 种不同典型水文年的总灌溉需水量由丰水年到枯水年依次呈增

加趋势,但总体灌溉需水量变化趋势基本一致。

由图 4d 可看出,泾惠渠灌区在 1988—2005 年期间,单位面积平均灌溉需水量在 3 种水文年基本保持在 370、310、260 mm 左右,在 2005 年时略有增加,随后呈小幅下降趋势,到 2014 年时,单位面积平均灌溉需水量在 3 种水文年分别为 360、290、240 mm。随后呈小幅下降趋势,说明 1988—2005 年期间的作物种植结构变化对灌区总灌溉需水量影响不大,而 2005—2014 年的种植结构变化有利于减少灌区总的灌溉需水量。

结合表 1 和图 4d 可知,灌区总的灌溉需水量大幅减少的主要原因也是由农作物种植面积大量减少而引起的。

2.5.2 灌区灌溉需水量的月际变化

根据不同典型水文年各月份有效降水量和全生

育期作物需水量,以及农作物种植结构数据,计算不同典型水文年灌区各月份的灌溉需水量。计算结果如图 5 所示。其中图 5a~5c 分别为丰水年、平水年

和枯水年的灌区各月份总灌溉需水量,图 5d~5f 分别为丰水年、平水年和枯水年灌区各月份单位面积平均灌溉需水量。

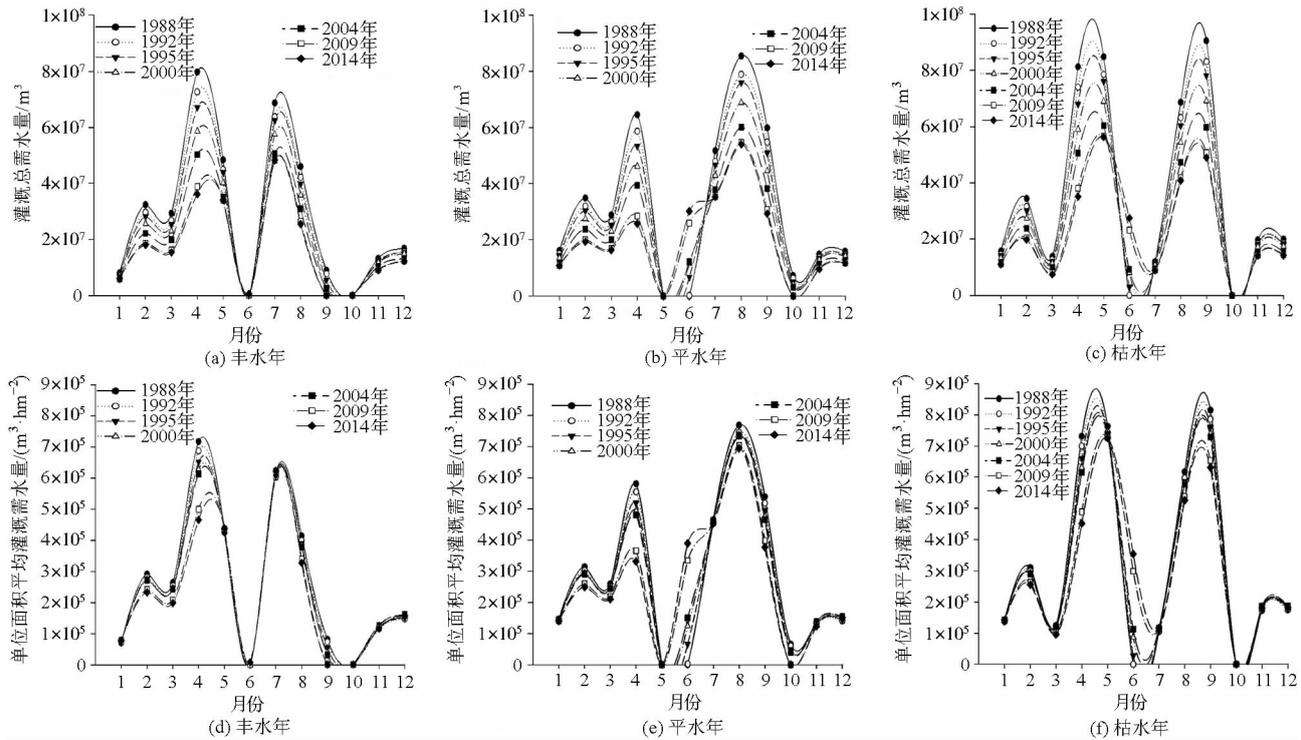


图 5 不同典型水文年灌区各月灌溉需水量及单位面积平均灌溉需水量的变化趋势

Fig. 5 Monthly crop irrigation requirement and average of unit irrigation requirement of Jinghuiqu Irrigation Area in different representative hydrologic years

由图 5 可以看出,泾惠渠灌区 1988—2014 年各月灌溉需水量都呈现 2 个主峰和 1 个次主峰趋势,2 个主峰区间分别出现在 4—5 月份和 7—9 月份,1 个次峰出现在 2 月份,这与灌区实施的冬灌、春灌和秋灌的灌溉制度基本一致,也与泾惠渠灌区主要农作物生长特点一致。

从图 5a~5c 可以看出,由于灌区不同水文年有效降水量的不同,灌区灌溉需水量出现峰值点也不同,丰水年时,灌溉需水量主峰点在 4 月份和 7 月份,平水年为 4 月份和 8 月份,而枯水年随着灌区种植结构的变化逐渐由 4—5 月份和 9 月份变为 5 月份和 8—9 月份,但需水量次峰值都出现在 2 月份。从图 5a~5c 还可以看出,随着种植结构的变化,在丰水年时,除 1 月份、10—12 月份的灌溉需水量保持不变,而 6 月份呈显著增加趋势,其余各月份的灌溉需水量都呈显著下降趋势;在平水年时,除 5—6 月份灌溉需水量有所增加外,其余各月份都呈现显著下降趋势;在枯水年时,3、7、10 月份的灌溉需水量基本保持不变,6 月份增加明显,其余各月份都呈显著下降趋势。

从图 5d~5f 可知,随着种植结构的变化,在丰水年时,4 月份和 9 月份的单位面积平均灌溉需水

量有显著减少趋势;在平水年时,2—4 月份和 8—10 月份呈显著下降趋势;在枯水年时,4 月份和 9 月份有显著下降趋势。在 3 种典型水文年中,单位面积平均灌溉需水量在 6 月份都呈显著增加趋势,而其余各月份基本保持不变。

从图 5d~5f 还可看出,随着灌区种植结构的变化,灌溉需水量逐渐减小,说明灌区调整后的作物种植结构更符合区域有效降水特点。

3 结论

(1) 以遥感影像获取的泾惠渠灌区历史种植结构数据为基础,根据区域实测气象数据和主要作物全生育期需水量,分别计算了不同典型水文年灌区作物需水量及灌溉需水量,并对灌区年际和月际灌区作物需水量及灌溉需水量进行了分析。结果表明,灌区总的作物需水量和灌溉需水量都呈现显著下降趋势,但随着灌区农业种植结构的变化,灌区单位面积作物需水量和灌溉需水量在 2005 年前基本保持不变,在 2005 年之后略有下降,这说明灌区总的作物需水量和灌溉需水量的下降是由农作物种植面积大量减少所致。

(2) 由于灌区作物种植结构的变化,各月份作

物需水量和灌溉需水量也发生了很大的变化,其中作物需水量除6月份显著增加外,其余各月份都呈减少或保持不变的趋势;灌溉需水量的逐渐减小,说明调整后的作物种植结构更符合区域有效降雨特点。

(3)以单位面积平均作物需水量和灌溉需水量作为衡量种植结构变化对灌区需水量的影响指标,

可以有效分析种植结构调整对灌区作物需水量和灌溉需水量变化趋势的影响,避免因种植面积大量减少而引起灌溉需水量减少的误导。通过种植结构变化对不同典型水文年年际和月际灌溉需水量的影响分析,对灌区种植结构调整和制定春灌、秋灌和冬灌等灌溉制度具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- 2 DOLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 1-8.
- 3 DENG X P, SHAN L, ZHANG H, et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1-3): 23-40.
- 4 陈玉民,郭国双. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京:中国农业科技出版社,1993.
- 5 梅旭荣,康绍忠,于强,等. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(6): 1149-1157.
MEI Xurong, KANG Shaozhong, YU Qiang, et al. Pathways to synchronously improving crop productivity and field water use efficiency in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(6): 1149-1157. (in Chinese)
- 6 马黎华,康绍忠,栗晓玲,等. 农作区净灌溉需水量模拟及不确定性分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 11-18.
MA Lihua, KANG Shaozhong, SU Xiaoling, et al. Simulation and uncertainty analysis of net irrigation requirement in agricultural area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(8): 11-18. (in Chinese)
- 7 刘钰,汪林,倪广恒,等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 6-12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 6-12. (in Chinese)
- 8 刘玉春,姜红安,李存东,等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 98-104.
LIU Yuchun, JIANG Hongan, LI Cundong, et al. Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 98-104. (in Chinese)
- 9 胡玮,严昌荣,李迎春,等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(9): 2367-2377.
HU Wei, YAN Changrong, LI Yingchun, et al. Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2367-2377. (in Chinese)
- 10 黄仲冬,齐学斌,樊向阳,等. 降雨和蒸散对夏玉米灌溉需水量模型估算的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 85-92.
HUANG Zhongdong, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Impact of rainfall and evapotranspiration on estimation of irrigation requirement of summer maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(5): 85-92. (in Chinese)
- 11 王进鑫,张晓鹏,高保山,等. 渭北旱塬红富士苹果需水量与限水灌溉效应研究[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(1): 69-72, 80.
WANG Jinxin, ZHANG Xiaopeng, GAO Baoshan, et al. Study on water requirement and limited irrigation effects of dwarfing red fuji apple tree on Weibei of loess plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(1): 69-72, 80. (in Chinese)
- 12 汪志农,雷雁斌,周安良,等. 灌区管理体制变革与监测评价[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.
- 13 张智韬,刘俊民,汪志农,等. 基于遥感和蚁群算法的多目标种植结构优化[J]. *排灌机械工程学报*, 2011, 29(2): 149-154.
ZHANG Zhitao, LIU Junmin, WANG Zhinong, et al. Multi-objective optimization of crop planting structure in irrigation area based on remote sensing technology[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011, 29(2): 149-154. (in Chinese)
- 14 刘燕,朱红艳. 泾惠渠灌区水环境劣变特征及地下水调蓄能力分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 19-24.
LIU Yan, ZHU Hongyan. Characteristics of inferior variation of water environment and regulating capacity of groundwater reservoir in Jinghui Canal Irrigation District of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(6): 19-24. (in Chinese)
- 15 张智韬,黄兆铭,李援农. 遥感影像土地利用方法研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(6B): 20-21.
ZHANG Zhitao, HUANG Zhaoming, LI Yuannong. The study of deriving landuse information from TM image[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(6B): 20-21. (in Chinese)
- 16 朱梅,王振龙. 淮北平原农作物生长期有效降水量的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2013, 40(5): 886-890.
ZHU Mei, WANG Zhenlong. Estimation of effective precipitation in Huabei plain during crop growth period[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2013, 40(5): 886-890. (in Chinese)
- 17 TONG L, KANG S, ZHANG L. Temporal and spatial variations of evapotranspiration for spring wheat in the Shiyang river basin in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 241-250.
- 18 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.

- of Ningxia sunflower [J]. Journal of Northwest Agriculture, 2009, 18 (5): 167 - 175. (in Chinese)
- 33 王蓉,何文寿,马玉波,等. 氮素用量对油菜氮磷钾养分吸收积累及产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2014,36(4):494 - 501.
WANG Rong, HE Wenshou, MA Yubo, et al. Effects of nitrogen application rate on nutrient uptake and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium and yield of oil sunflower [J]. Journal of Chinese Oil Crops, 2014, 36(4): 494 - 501. (in Chinese)
- 34 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M]. 北京:气象出版社,1999:82 - 85.
- 35 孟凯,张兴义,隋跃宇,等. 黑土农田水肥条件对作物产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2005,13(2): 119 - 121.
MENG Kai, ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, et al. Soil water and fertilizer on crop yield and water use efficiency [J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2005, 13(2): 119 - 121. (in Chinese)
- 36 吕刚,史东梅. 三峡库区春玉米水肥耦合效应研究[J]. 水土保持学报,2005,19(3):192 - 195.
LÜ Gang, SHI Dongmei. Journal of soil and water conservation of spring maize and the coupling effect of water and fertilizer [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 192 - 195. (in Chinese)
- 37 叶优良,孙建好,李隆,等. 小麦/玉米间作根系相互作用对氮素吸收和土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业工程学报,2005, 21(11):33 - 37.
YE Youliang, SUN Jianhao, LI Long, et al. Effect of root interaction on nitrogen uptake and nitrate nitrogen content in wheat/maize [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 33 - 37. (in Chinese)
- 38 刘小刚,张富仓,杨启良,等. 调亏灌溉与氮营养对玉米根区土壤水氮有效性的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(2):135 - 141.
LIU Xiaogang, ZHANG Fucang, YANG Qiliang, et al. Effects of regulated deficit irrigation and nitrogen nutrition on soil water and nitrogen availability in maize root zone [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 135 - 141. (in Chinese)
- 39 宁堂原,焦念元,李增嘉,等. 施氮水平对不同种植制度下玉米氮利用及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报,2006, 17(12):2332 - 2336.
- 40 刘佳,何清,刘蕊,等. 新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况[J]. 干旱气象,2008,26(4):61 - 66.
LIU Jia, HE Qing, LIU Rui, et al. The characteristics of solar radiation and its solar energy resources in Xinjiang [J]. Arid Meteorology, 2008, 26(4): 61 - 66. (in Chinese)
- 41 刘胜利,黄春燕,柳延涛. 油葵冠层光合有效辐射及其截获量的特征分析[J]. 中国油料作物学报, 2013,35(增刊): 371 - 374.
LIU Shengli, HUANG Chunyan, LIU Yantao. An analysis of the characteristics of the effective radiation and interception in the canopy of oil sunflower[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(Supp.): 371 - 374. (in Chinese)

(上接第 130 页)

- 19 宋妮,孙景生,王景雷,等. 基于 Penman 修正式和 Penman - Monteith 公式的作物系数差异分析[J]. 农业工程学报,2013, 29(19):88 - 97.
SONG Ni, SUN Jingsheng, WANG Jinglei, et al. Analysis of difference in crop coefficients based on modified Penman and Penman - Monteith equations[J]. Transactions of the CASE, 2013, 29(19): 88 - 97. (in Chinese)
- 20 胡永翔,李援农,张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验[J]. 农业机械学报,2012,43(11):87 - 91.
HU Yongxiang, LI Yuannong, ZHANG Ying. Experiment on crop coefficient and water requirement of drip-irrigation Jujube in Loess Plateau of China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 87 - 91. (in Chinese)
- 21 COLDITZ R R, SCHMIDT M, CONRAD C, et al. Land cover classification with coarse spatial resolution data to derive continuous and discrete maps for complex regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3264 - 3275.
- 22 LHERMITTE S, VERBESSELT J, VERSTRAETEN W W, et al. A comparison of time series similarity measures for classification and change detection of ecosystem dynamics[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3129 - 3152.
- 23 段爱旺,孙景生,刘钰,等. 北方地区主要作物灌溉用水定额[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2004.
- 24 蔡学良,崔远来. 基于异源多时相遥感数据提取灌区作物种植结构[J]. 农业工程学报,2009,25(8):124 - 130.
CAI Xueliang, CUI Yuanlai. Crop planting structure extraction in irrigated areas from multi-sensor and multi-temporal remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(8): 124 - 130. (in Chinese)
- 25 LIU Y, TEIXEIRA J L, ZHANG H J, et al. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 1998, 36(3): 233 - 246.
- 26 左余宝,田昌玉,唐继伟,等. 鲁北地区主要作物不同生育期需水量和作物系数的试验研究[J]. 中国农业气象,2009, 30(1):70 - 73.
ZUO Yubao, TIAN Changyu, TANG Jiwei, et al. Studies on ET_c and K_c of main crops in northern Shandong Province [J]. Chinese Journal of Agro-meteorology, 2009,30(1): 70 - 73. (in Chinese)
- 27 ZWART S J, BASTIAANSEN W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize[J]. Agricultural Water Management,2004, 69(2): 115 - 133.