

美国德克萨斯州高地平原区地下水灌溉管理方法研究

胡亚琼, 刘 静, 廖丽莎

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要:德克萨斯州高地平原区是美国灌溉和旱地作物的生产基地,其灌溉水源主要来源于奥加拉拉(Ogallala)地下水含水层。然而,自从1950年灌溉农业发展以来,由于对奥加拉拉含水层地下水的过度开采,使得区域地下水位严重下降,有些地区地下水位下降超过50 m。为了保护地下水资源和实现地下水可持续利用,2000年以来美国德克萨斯州高平原地区在节水压采方面开展了一系列工作,取得了较好的成效。采取的主要措施包括:用德克萨斯州高地平原蒸腾蒸发网络(The Texas High Plains Evapotranspiration Network, TXHPET)进行灌溉及地下水管理,改变作物品种,改进灌溉技术,改变种植结构,保护性耕作方法,加强降雨管理,将小部分灌溉农田转为旱作农田等。该区域1958年的灌溉面积为183万 hm^2 ,1974年灌溉面积达到峰值,为242万 hm^2 ;1989年灌溉面积降为159万 hm^2 ,由于喷灌技术的推广应用,2000年灌溉面积恢复到187万 hm^2 。1958年大多数灌区为地面灌溉,仅有11%的灌溉面积为喷灌。1974年之后,灌溉总面积在减少,主要灌溉方式转为喷灌,中心支轴式喷灌面积稳步增长。自1989年之后,喷灌在该区域快速发展,2000年喷灌面积已占该区域灌溉面积的72%。早期的喷灌系统在较高压力下运行,自20世纪80年代,低压喷灌系统已全面使用。我国华北地区长期超量开采地下水与美国德克萨斯州高原区地下水超采情况和问题相似。兹系统介绍了美国德克萨斯州高地平原区在地下水超采情况下采取的综合措施拟为我国地下水超采地区的地下水管理工作提供技术与经验参考。

关 键 词:德克萨斯州高原地区;地下水超采;综合管理技术;农业节水措施;节水灌溉技术

中图分类号:S274.3

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.20180247

胡亚琼,刘静,廖丽莎.美国德克萨斯州高地平原区地下水灌溉管理方法研究[J].灌溉排水学报,2019,38(1):96-100,115.

0 引 言

我国华北地区水资源短缺,多年来,由于地下水资源的无序开发,华北地区已经成为全国最大的地下水超采区。2012年华北地区地下水超采区面积达到了18.49万 km^2 ,共涉及297个县市区。该地区地下水的长期超量开采导致地下水位不断下降,引发一系列地质环境和生态环境问题,同时,随着气候变化的影响,干旱等极端事件发生频繁,饮水安全和农业灌溉已受到威胁^[1-3]。目前,为实现华北地区水资源的可持续利用和逐步改善水环境,我国华北地区正在实施节水压采规划(2014—2018年)。事实上,我国华北地区和美国西部干旱半干旱地区的地下水超采现象极为类似。自1950年以来,美国西部干旱半干旱地区由于干旱气候和灌溉的快速发展,地下水开采量逐年增加,开采量超过其自然补给量,使得该区域内地下水位呈逐年下降的趋势,而地下水开采面积逐年递增^[4]。西部干旱半干旱地区是美国最重要的棉花和小麦生产基地,农业灌溉用水是第1用水大户,用水量占总供水量的60.3%^[5]。以德克萨斯州为例,灌溉用水是德州主要用水户,2008年总的灌溉面积达到217万 hm^2 ,2008年总灌溉用水量为84.1亿 m^3 ,单位用水量为3 960 m^3/hm^2 ,其中地下水灌溉面积为190万 hm^2 ,地下水抽取量为68.5亿 m^3 ,占总用水量的81.4%^[6-7]。自20世纪80年代以来美国德克萨斯州高平原地区在节水压采方面开展了大量水资源统一管理技术、节水技术、管理措施等工作,取得了较好的成效。这些经验和做法可为我国华北地区实施地下水压采工作在宏观管理及战略发展方面提供参考。

收稿日期:2018-04-27

作者简介:胡亚琼(1973-),女,河南人。教授级高级工程师,硕士,主要从事农田水利工作。E-mail: huyq@iwhr.com

1 德克萨斯州高地平原区地下水开发及问题

德克萨斯州高地平原区是美国灌溉作物和旱地作物的生产基地。主要作物包括玉米、陆地棉、高粱和冬小麦,还包括花生、饲料及大豆。未来饲料的灌溉面积将会逐步增加,以满足该地区不断增长的奶制品市场需求^[5]。在该地区灌溉作物产量是旱地作物产量的2~4倍,使得灌溉农业成为当地经济发展的重要支柱。大型灌溉农业始于20世纪30—40年代,当时抽取地下水的各项条件已经具备^[9]。20世纪50年代该地区发生了严重的干旱,但由于灌溉农业快速发展,使得大面积的作物免于灾难^[4]。

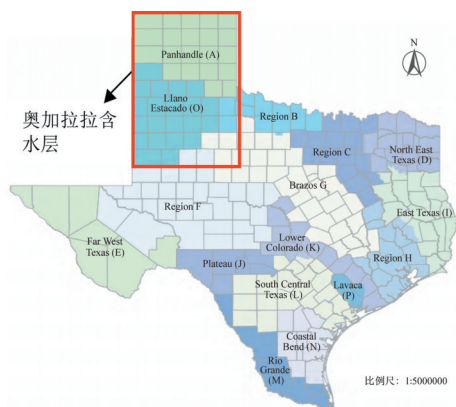


图1 德克萨斯州高地平原区位置图

由于地表水资源缺乏,德克萨斯州高地平原区90%的灌溉水来自于奥加拉拉(Ogallala)地下水含水层。然而,自从灌溉农业发展以来,由于对奥加拉拉含水层地下水的过度开采,使得区域地下水位严重下降,有些地区地下水位下降超过50 m,提取地下水能耗费用成为灌溉成本的主要部分^[10]。1974年后,由于单井出水量的减少,提水扬程的提高,不断增加的电费费用以及相对稳定的商品市场价格,使得地下水的提取量有所下降^[4]。因此,一些地区的地下水位快速下降得到缓解。在2005年第79届德克萨斯州立法大会上,要求在地下水管理区域建立地下水开采的上限,这对德克萨斯州高地平原区的灌溉农业长期稳定发展起到了积极的作用^[11-12]。

如图1所示,德克萨斯州的水规划区域A区和O区(框中部分所示)为德克萨斯州高地平原区,包含39个县,其全部或部分位于奥加拉拉(Ogallala)含水层之上。该地区属半干旱气候,降雨时空分布不均。由于太阳辐射强、蒸汽压高及较强的地区热气流对流,使得该区域蒸发量大,年蒸发量约为2 500 mm(用A类蒸发皿测量)。

2 德克萨斯州高地平原区灌溉面积及灌溉技术发展情况

该区域1958年灌溉面积183万 hm^2 ,1974年灌溉面积达到峰值,为242万 hm^2 ;1989年灌溉面积降为159万 hm^2 ,2000年为187万 hm^2 。1958年大多数灌区为地面灌溉,仅有11%的灌溉面积为喷灌。1974年之后,灌溉总面积在减少,主要灌溉方式转为喷灌,中心支轴式喷灌面积稳步增长。自1989年之后,喷灌在该区快速发展,2000年喷灌面积已占该区域灌溉面积的72%。早期的喷灌系统在较高压力下运行,自20世纪80年代,低压喷灌系统已全面使用^[13]。德克萨斯州高地平原的灌溉方式变化情况如图2所示(资料来源:Texas Water Development Board, 2001)。

地下滴灌(Subsurface Drip Irrigation, SDI)于1984年前后在该区域南部地区使用,主要用于棉花种植^[14]。2000年地下滴灌面积约有8 000 hm^2 ,2004年安装了约10万 hm^2 地下滴灌设施。与喷灌相比,地下滴灌能够提高作物产量和用水效率,同时能够提高土壤温度(减少蒸发冷却)。保持较高的土壤温度,对于作物早期发育,尤其是棉花生产至关重要。但是,相对于中心支轴的喷灌,地下滴灌管理要求相对较高,尤其是对水源水质的要求较高。在干旱加剧、能耗不断增加、水资源不断减少,以及棉花种植面积增加的情况下,地下滴灌将会获得广泛的应用^[15-17]。

图3为德克萨斯州高地平原区灌溉面积、抽取水量及灌水深度的变化情况(资料来源:Texas Water Development Board, 2001)。该地区地下水抽取量总量与灌溉面积的变化趋势相似,1954年地下水抽取量总量为64亿 m^3 ,1974年达到高峰,1989年为最低,2004年地下水抽取量总量为74亿 m^3 。平均灌水深度1958年为348 mm,1964年为463 mm,1979年为326 mm,2004年为395 mm。平均灌水深度可能会受到渠系输水及蒸发损失的影响。该地区很多明渠已被压力管道代替,以减少输水损失。灌溉面积、灌溉水量受到商品价

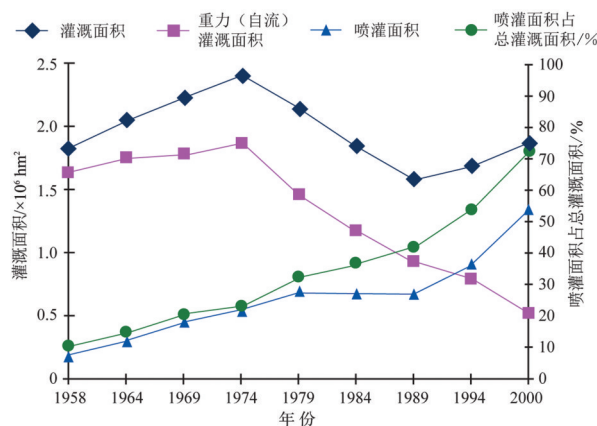


图2 德克萨斯州高地平原灌溉方式变化情况

格、政府补助、能耗费用、降雨模式和灌溉方式等多方面的影响。期间,单井出水量大幅下降,导致抽水井数量急剧增加,图4显示了该地区抽水井数量的变化情况。

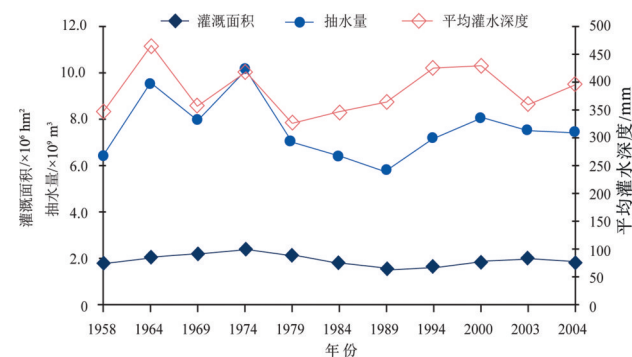


图3 灌溉面积、抽取水量及灌水深度的变化情况

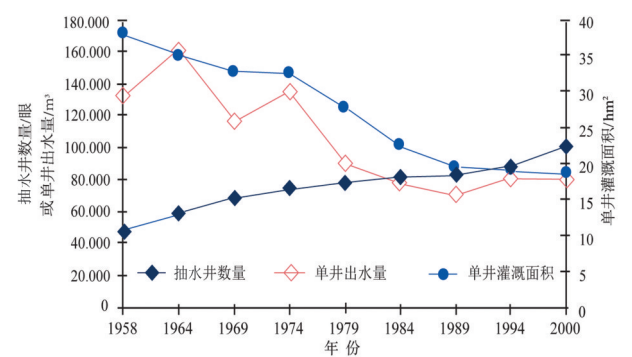


图4 抽水井数量、单井出水量及单井灌溉面积情况

3 德克萨斯州高地平原区作物产量及作物灌溉需求情况

在高地平原区北部,主要灌溉作物为玉米(占26%)、棉花(占23%)、高粱(占10%)、冬小麦(占30%),其他作物还有花生、大豆等。表1给出了1988—2005年德克萨斯州北部高地平原作物种类、灌溉情况及平均产量。玉米、大豆及花生几乎全部灌溉,而其在旱地的产量远不及棉花、高粱及冬小麦。

表1 德克萨斯州北部高地平原作物种类及产量

作物品种	旱地面积/hm ²	灌溉面积/hm ²	作物灌溉率/%	占总灌溉面积比例/%	旱地产量/(×10 ³ kg·hm ⁻²)	灌溉产量/(×10 ³ kg·hm ⁻²)
玉米	497	294 219	100	26	--	11.82
棉花	71 302	267 109	79	23	0.42	0.88
高粱	167 356	113 414	40	10	2.29	4.85
花生	78	1 081	93	0	--	2.88
大豆	0	25 149	100	2	--	2.33
冬小麦	581 702	338 136	37	30	1.64	3.37
青饲料	70 293	41 029	37	4	10.57	26.37
其他	37 126	61 080	62	5		
总计	928 353	1 141 216	55			

注 资料来源:United States Department of Agriculture, 2006。

高地平原区南部,灌溉面积仅占总耕作面积的43%,主要是奥加拉拉饱和含水层厚度在南部边界逐渐减少。表2给出了1988—2005年德克萨斯州南部高地平原作物种类、灌溉情况及平均产量。从表1和表2可以看出,在高地平原区,灌溉作物产量是旱地作物产量的2倍多。

表2 德克萨斯州高地平原南部作物种类及产量

作物品种	旱地面积/hm ²	灌溉面积/hm ²	作物灌溉率/%	占总灌溉面积比例/%	旱地产量/(×10 ³ kg·hm ⁻²)	灌溉产量/(×10 ³ kg·hm ⁻²)
玉米	952	20 273	96	3	-	10.31
棉花	652 701	502 309	43	65	0.35	0.75
高粱	173 173	52 890	23	7	1.86	3.56
花生	0	69 980	100	9	-	3.97
大豆	0	4 543	100	1	-	1.68
冬小麦	118 966	56 920	32	7	1.33	2.56
青饲料	30 390	10 663	26	1	3.92	26.43
其他	24 879	49 564	67	6		
总计	1 001 061	767 142	43			

注 资料来源:United States Department of Agriculture, 2006。

在灌溉用水量方面,北部高地平原区玉米灌溉用水量占了41%,冬小麦为23%,棉花为18%;南部高地平原62%的水量用于灌溉棉花。北部高地平原区的地下水抽取量为48.5亿m³/a,其中19.8亿m³/a用来灌溉玉米。南部高地平原区的地下抽水量为30.3亿m³/a。棉花、玉米和冬小麦是南部和北部高地平原区3种主要作物,减少其灌溉用水量对减少奥加拉拉含水层的地下水抽取将产生重要影响。表3给出了1998—2005年北部和南部高地平原区的年平均灌溉用水量。

表3 德克萨斯州南、北部高地平原区年平均灌溉用水量

作物品种	北部高原区		南部高原区		南部、北部	
	灌溉水量/亿 m ³	占该区总灌水量比例/%	灌溉水量/亿 m ³	占该区总灌水量比例/%	灌溉水量/亿 m ³	占该区总灌水量比例/%
玉米	19.8	41	1.2	4	21	27
棉花	8.6	18	18.9	62	27.5	35
高粱	4.5	9	1.9	6	6.4	8
花生	0	0	3.7	12	3.7	5
大豆	0.9	2	0.2	1	1.1	1
冬小麦	11.2	23	2	7	13.3	17
饲料作物	1.2	3	0.4	1	1.6	2
其他作物	2.2	5	2.1	7	4.3	5
总计	48.5		30.3		7.88	

注 资料来源: Texas Water Development Board, 2006。

4 德克萨斯州高地平原区减少灌溉用水量的发展策略

为了合理利用现有水资源,美国农业需求及预测委员会依据灌溉作物特征给出了7种节水策略选择,包括:根据德克萨斯州高地平原区蒸腾蒸发网络(The Texas High Plains Evapotranspiration Network, TXHPET)进行灌溉管理、改变作物品种、改进灌溉技术、改变种植结构、保护性耕作方法、加强降雨管理和将小部分灌溉农田转为旱作农田。这些节水策略的目标是在不减少灌溉面积和作物生产率的情况下减少地下水抽取量。表4给出了7种节水战略和其影响分析。

表4 德克萨斯州高地平原区节水战略及其影响结果

灌溉用水减少战略	累计节水量/	(节水量/总灌溉	执行费用/	(执行费用/节水量)/	直接地区经济	(直接地区经济影响/
	亿 m ³	水量)/%	×10 ³ \$	(×10 ³ \$/10 m ³)	影响/×10 ³ \$	节水量)/(×10 ³ \$/亿 m ³)
TXHPET	25. 5	1.96	8 100	318	+	+
改变作物品种	82.2	6.32	*	*	-1 549 000	-18 841
改变灌溉技术	50.9	3.91	169 600	3 331	*	*
改变作物类型	107.5	8.26	46 000	428	-2 054 000	-19 104
保护耕作方法	26.4	3.02	1 100	42	*	*
加强降雨管理	50.7	3.89	25 800	509	+	+
将边缘的灌溉农田转为旱作农田	63.7	4.89	39 000	613	-406 000	-6 377

注 *为未量化,+为未量化但预期是积极的。

在以上的节水策略中,有如下方面已经在德克萨斯州高地平原区得到运用:德克萨斯州高地平原蒸腾蒸发网络增加基于气候条件的灌溉制度;将现有的重力(自流)灌溉面积转变成中心支轴灌溉;用低需水作物代提高需水作物,如用棉花替代玉米。总体来说,如果德克萨斯州高地平原区蒸腾蒸发网络使用量增倍,重力(自流)灌溉面积减少 10%,地下水抽取量将会减少 14%;另外,如果 50%的玉米灌溉面积转变为棉花灌溉面积,又将减少 8%的地下水抽取量。图5给出了在德克萨斯州高地平原区蒸腾蒸发网络(TXHPET)的不同影响下以及使用中心支轴灌溉条件下,北部和南部高地平原从奥加拉拉含水层的取水量。图6给出了在不同的德克萨斯州高地平原蒸腾蒸发网络(TXHPET)使用影响下,由玉米作物转为棉花时地下水的抽水量。

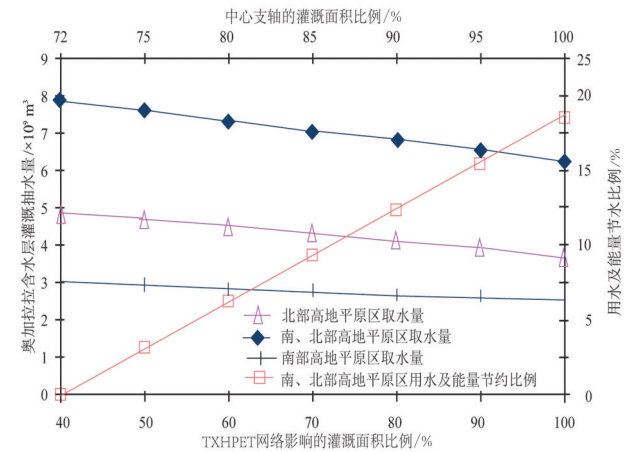


图5 TXHPET的不同影响以及使用中心支轴灌溉条件下南、北高地平原区的取水量

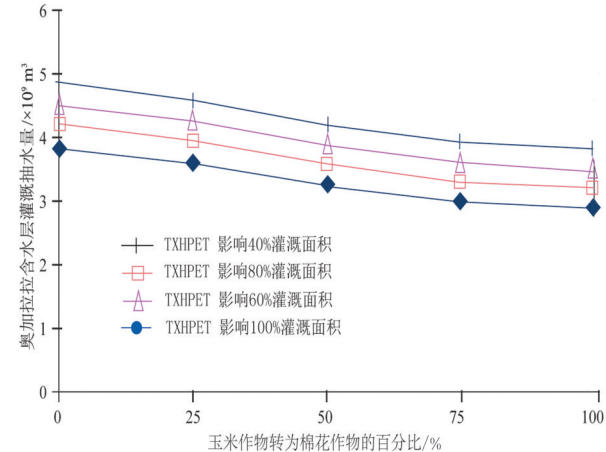


图6 不同的TXHPET使用影响下,改变作物种类时地下水的抽水量

5 讨论与结论

美国德克萨斯州高地平原区是美国灌溉和旱地作物的生产基地。由于对奥加拉拉含水层地下水的过度开采,使得区域地下水位严重下降,有些地区地下水位下降超过 50 m。为了解决该区域地下水超采的问题,采取了多种节水策略,包括用德克萨斯州高地平原蒸腾蒸发网络(The Texas High Plains Evapotranspiration Network, TXHPET)进行灌溉管理、改变作物品种、改进灌溉技术、改变种植结构、保护性耕作方法、加强降雨管理和将小部分灌溉农田转为旱作农田,取得了良好的效果。我国华北地区地下水严重超采,前些年实施了节水压采项目,取得一定效果,但难以扭转华北地区地下水超采的状况。与德克萨斯州高地平原区地下水管理相比,存在的主要不足有如下几个方面:①没有对地下水进行精准的模拟研究,没有分析节水灌溉与地下水采补的量化关系;②采用的措施单一,主要集中在田间节水灌溉技术措施上,没有开展系统的节水措施研究和应用;③没有制定实施有效地下水管理政策;④没有将田间的节水与区域整体的节水策略相联系,导致节水投资效果不显著。因此,美国德克萨斯州高地平原区在控制地下水过度开采时采取的多种节水策略和综合措施是值得我们学习和借鉴的。

参考文献:

- [1] 陈皓锐,王少丽,高占义,等. 运东平原区 1976 年以来地下水位变化特征分析. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 114-118.
- [2] 束仓龙,杨建青,王爱平,等. 地下水动态预测方法及其应用. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [3] 高占义,王少丽,胡亚琼,等. 气候变化对地下水影响研究. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [4] MUSICK J T, PRINGLE F B, HARMAN W L, STEWART BA. Long-term irrigation trends: Texas High Plains [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1990, 6(6): 717-724.
- [5] SOPHOCLEOUS M. Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA—lessons and recommended actions [J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(3): 559-575.
- [6] Water for Texas 2012 State Water plan [R]. USA: 2012.
- [7] SOPHOCLEOUS M. Conserving and extending the useful life of the largest aquifer in North America: The future of the High Plains/Ogallala Aquifer [J]. Groundwater, 2012, 50(6): 831-839.
- [8] HOWELL T A. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture [J] Agronomy Journal, 2001, 93(2): 281-289.
- [9] MUSICK J T, PRINGLE F B, WALKER J J. Sprinkler and furrow irrigation trends: Texas High Plains [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1988, 4(1): 46-52.
- [10] MCGUIRE V L. Water-level change in the High Plains Aquifer, predevelopment to 2001, 1999 to 2000, and 2000 to 2001 [EB/OL]. USGS Fact Sheet FS-078-03, 2003.
- [11] MACE R E, PETROSSIAN R, BRADLEY R, et al. A streetcar named desired conditions: The new groundwater availability for Texas[C]//In State Bar of Texas 7th Annual The Changing Face of Water Rights in Texas, 18-19 May, San Antonio, TX, 2006.
- [12] TAYLOR R H, ALMAS L K, COLETTE W A. Economic analysis of water conservation policies in the Texas Panhandle[C]//Selected paper prepared for Southern Agricultural Economics Association Annual Meeting, Mobile, AL, 4-7 February, 2007.
- [13] LYLE W M, BORDOVSKY J P. LEPA irrigation system evaluation [EB/OL]. Transactions of ASAE, 1983, 26(3): 776-781.
- [14] HENGGELE J C. A history of drip-irrigated cotton in Texas. In Microirrigation for a Changing World: Conserving Resources/Preserving the Environment[C]. Proceeding of Fifth International Microirrigation Congress, Lamm FR(ed.). American Society for Agricultural Engineering, St Joseph, MI; 1995, 669-674.
- [15] BORDOVSKY J P, PORTER D. Cotton response to pre-plant irrigation level and irrigation capacity using spray, LEPA. And subsurface drip irrigation [C]//Presented at the 2003 ASAE International Meeting, Las Vegas, NV, 27-30 July, ASAE Paper No. 032008.2003.
- [16] COLAIZZE P D, SCHNEIDER A D, EVETT S R, et al. Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for grain sorghum [EB/OL]. Transactions of ASAE 2004, 47(5): 1477-1492.
- [17] COLAIZZI P D, EVETT S R, HOWELL T A. Cotton production with SDI, LEPA, and spray irrigation in thermally-limited climate[C]// Irrigation Association Annual Meeting. Phoenix, AZ, 6-8 November, 2005.

(下转第 115 页)

Correlation Analysis of the Factors that Affect Water and Soil Qualities in Coal Mining Areas

ZHANG Kaiyuan, WANG Jin*, BI Rutian, LIU Jian

(College of Resources & Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: **【Objective】** Coal mining could pollute water and soil and in this paper we analyzed some factors which we believed have detrimental impact on soil and water qualities in coal mining regions. **【Method】** The analysis was based on data collected from 12 coal mines. We used the EViews software to analyze 12 factors which we believe have direct or indirect impact on water and soil qualities. For seven out of the 15 factors, we analyzed them using the nuclear density estimation method and quantified their statistical and correlative characteristics. Combined with the multiple regression analysis, the comprehensive impact of these factors on water and soil qualities in the studied mines was determined, from which we found the main factors. **【Result】** The main factors affecting water consumption in the 12 mines were groundwater flow and total water consumption. The logarithm of the nuclear density curves of the two factors did not have noticeable peaks. The nuclear density curve of groundwater flow varied widely, indicating that there was a difference between the 12 coal mines. The longevity of service and the size of the mines were the main factors responsible for soil deterioration, and the peaks of their logarithmic nuclear density curves were close. The steep nuclear density curve for the longevity of service indicated that the size of the coal mines had a significant impact on soil quality. **【Conclusion】** The main factors impacting water and soil qualities in the studied coal mines are groundwater flow, total water consumption, and longevity of service and size of the mines.

Key words: damage of water and land resources; scatter fitting method; nuclear density estimation; multiple regression analysis; influence factor

责任编辑:刘春成

(上接第100页)

Groundwater Management in Texas High Plain

HU Yaqiong, LIU Jing, LIAO Lisha

(China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Texas High Plain is a major base for irrigated and dryland crops in USA. The main water source in the area is from the Ogallala Aquifer. However, since the development of irrigated agriculture in 1950, groundwater in the Ogallala Aquifer has been overused with groundwater tables dropped to 50 meters below the ground surface in some regions. To protect groundwater resources and achieve sustainable groundwater application, comprehensive technical and management measures have been taken over the past 15 years to alleviate detrimental impacts caused by groundwater overuse. The main measures taken included introduction of the Texas High Plains Evapotranspiration Network (TXHPET) for irrigation and groundwater management, increasing crop varieties and crop pattern, improving irrigation technologies, protection cultivation and rainfall management, and transforming some irrigated agriculture into rainfed agriculture. In 1958, the total irrigated area was 1 830 000 hm², and peaked at 2 420 000 hm² in 1974, followed by a reduction to 1 590 000 hm² in 1989 prior to recovering to 1 870 000 hm² in 2000 due to large-scale application of sprinkler irrigation. The main irrigation method in 1958 was surface irrigation, with only 11% of sprinkler irrigation area. Since 1974, the irrigated area has been reduced and the central pivot irrigation has been developed quickly. In 2000, about 72% of irrigated area was sprinkler-irrigated. The early sprinkler application was under high pressure, and low pressure sprinkler ushered in after 1980. As the north China plain is similar to the Texas High Plain, the experiences of Texas High Plain area could provide valuable help for groundwater management in north China.

Key words: Texas High Plain; groundwater over development; comprehensive management measures; agricultural water-saving measures; water-saving irrigation technology

责任编辑:赵宇龙