

基于能值理论方法的农田灌溉气候调节效益估算

何冰晶, 王双银, 杨建国, 程冬玲, 贾子烨

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 传统的农田灌溉效益估算只考虑经济效益, 不利于处理好农田灌溉与生态环境、经济发展的相互关系, 构建现代化农田灌溉体系应充分考虑农田灌溉生态效益。采用水量平衡相关理论和能值理论方法构建农田灌溉气候调节效益模型, 并以陕西省为例核算出 2008-2018 年不同区域的气候调节效益值, 对影响因素进行了分析。结果表明: 关中地区气候调节效益最大, 陕北地区气候调节效益最小, 陕南、关中和陕北气候调节单方水效益分别约为 0.011 0、0.035 0、0.006 9 元/m³; 经济发展水平程度是影响气候调节效益高低的关键要素; 三大典型区域的农田气候调节单方水效益随时间变化总体呈上升趋势。

关键词: 能值理论; 农田灌溉; 气候调节效益; 陕西省

中图分类号: S607⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)06-0230-06

Estimation of climate regulation benefits of farmland irrigation based on energy theory

HE Bingjing, WANG Shuangyin, YANG Jianguo, CHENG Dongling, JIA Ziyue

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

Abstract: The conventional estimation of farmland irrigation benefits has only taken economic benefits into consideration, which is unfavourable for dealing well with the correlation of farmland irrigation, ecological environment and economic development. To establish modernized farmland irrigation system, its ecological benefits should be substantially considered. We established a benefit model of climate regulation for farmland irrigation using relevant theories of water balance and energy theory, and then took Shaanxi Province as an example to calculate the climate regulation benefits in different regions from 2008 to 2018 and analyzed the influencing factors. The result show that the climate regulation benefits were greatest in Guanzhong region, but lowest in northern Shaanxi, and the climate regulation benefits per square meter in southern Shaanxi, Guanzhong and northern Shaanxi were 0.011 0 yuan/m³, 0.035 0 yuan/m³ and 0.006 9 yuan/m³, respectively. It is found that the extent of economic development is the key factor influencing the climate regulation benefits, and the farmland climate regulation benefits per square meter in the three typical regions rise with time in general.

Key words: energy theory; farmland irrigation; climate regulation benefit; Shaanxi Province

1 研究背景

农业在我国产业中处于基础地位, 灌溉在农业生产过程中是重要的一环, 这就要求提供丰沛的农田灌溉, 只有这样才能保障农业生产能够持续性地向好向稳发展^[1]。通常人们只关注农田灌溉所带来的直接效益(粮食增产、农民增收等), 忽略了

其间接效益(气候调节、土壤净化等)。生态环境正效益一直被整个区域所享用, 却没有在市场交易中体现。因此研究农田灌溉气候调节效益, 有利于明确农业供水成本分担关系, 对促进乡村振兴和保障粮食安全、水安全具有重要的意义。

近年来, 随着我国社会经济的飞跃式发展, 社会公众对于物质层面以及精神层面上的追求与日俱

收稿日期: 2020-07-28; 修回日期: 2020-10-15

基金项目: 陕西水利科技计划项目(2019slkj-03)

作者简介: 何冰晶(1995-), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为水资源可持续利用与保护。

通讯作者: 王双银(1969-), 男, 甘肃镇原人, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要从事水文极值事件和水资源配置方面研究。

增,对生态环境问题的关注度也越来越高。国内外学者对气候调节生态服务价值的研究主要集中在湖泊、河流、草地、湿地、森林等领域^[2-8],而对农田灌溉所带来的气候调节效益鲜有研究。

目前,研究农田灌溉水蒸发产生的降温增湿效益的方法主要有3种,即当量因子法^[9-10]、替代市场法^[11-12]、能值分析法^[13]。其中能值理论分析方法能够在一定程度上避免人为影响及随机性^[14-15],它在反映生态效益的客观性方面的优势是无法被替代的。同时由于能值分析方法在旱作物灌溉气候调节效益的研究中,尤其是在反映旱作物和稻田作物灌溉气候调节效益的时空差异性方面应用较少,故有较好的研究价值。

基于以上背景,结合农业、灌溉、气象、水文、生态经济等相关学科理论,以陕西省为例,从时间和空间上利用能值理论方法构建农田灌溉气候调节效益模型,并对主要旱作物和水稻灌溉气候调节效益进行评估,为陕西省灌区供水效益分析和水价分担提供理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

农田灌溉用水量数据来源于《2008-2018年陕西省水资源公报》,自然资源和经济数据来源于《2009-2019年陕西省统计年鉴》《2018年陕西省区域统计年鉴》《2008-2018年各市(区)国民经济和社会发展统计公报》和《2019年中国统计年鉴》。

2.2 能值理论方法

能值理论是对自然资源及其社会和经济活动进行定量评估相对科学合理的理论,它最初是由美国著名专家 Odum 教授提出的,当前已经广泛应用于社会、生态、经济领域的系统性研究中。该理论基于太阳能的能值,利用能值转化率将许多种类的不可比较的能量转化为相同体系下的太阳能能值,在更深层次上对资源、环境以及一系列的经济活动进行计量以测算真实价值^[16]。换算计算公式为:

$$EM = \tau B \quad (1)$$

式中: EM 为能值,sej; τ 为能值转换率,sej/J 或 sej/g,本文取值参照文献^[17]; B 为能量或物质的质量,J 或 g。

在效益价值定量计算中,效益能值与其相应的货币价格之间存在定量关系,计算公式为:

$$P = EM \times \frac{1}{EDR} \quad (2)$$

式中: P 为效益能值对应的价值,元; EDR 为能值货币比率,sej/元,其值由研究区全年所利用的太阳能值与国民生产总值之比确定^[18]。

2.3 农田灌溉气候调节效益分析方法

作物在生长过程中,通过植株蒸腾和棵间蒸发的作用,将植物体内的水分和土壤水分以气体形式扩散到空气中去,为此消耗热量,从而降低温度增加湿度^[19],体现了气候调节功能。农田灌溉总蒸散发能量为:

$$EB = 10^6 L \cdot ET \quad (3)$$

式中: EB 为农田灌溉总蒸散发能量,J; L 为蒸发潜热(本文采用文献^[20]中蒸发潜热公式,即 $L = 2500 - 2.2T$,其中 T 为年平均温度, $^{\circ}\text{C}$, J/m^3 ; ET 为农田灌溉总蒸散发量, m^3 。

农田灌溉分为旱作物灌溉和稻田灌溉。对于旱作物,净灌溉用水量全部作用于植物蒸散发量;对于稻田,灌溉用水量除了用于植株蒸腾和棵间蒸发外,还有一部分消耗于田间渗漏。适当的渗漏量起到促进土壤通气和消除有毒物质等作用,有利于水稻生长^[21],这部分水量不计入稻田蒸散发量。在水稻生长发育期内需要进行灌溉排水,分为分蘖期晒田排水和黄熟期落干排水,其排水量也不能计入稻田蒸散发量。因此稻田净灌溉用水量除去田间渗漏量和排水量则为稻田的蒸散发量。

对于整个农田灌溉而言,其作物的蒸散发量为:

$$ET \approx I - \sum 10(F_d + D) \cdot A_{\text{稻田}} \quad (4)$$

式中: I 为农田净灌溉用水量, m^3 ; F_d 为稻田渗漏量,mm; D 为稻田排水量,mm; $A_{\text{稻田}}$ 为稻田灌溉面积, hm^2 。

结合公式(1)、(2)和(3),可得到不同年份不同区域农田灌溉气候调节总效益(价值)和单方水效益(价格)模型:

$$P_{(ij)} = \frac{EB_{ij} \cdot \tau_s}{EDR_{ij}} \quad (5)$$

$$P_{cr(ij)} = \frac{EB_{ij} \cdot \tau_s}{W_{ij}} \cdot \frac{1}{EDR_{ij}} \quad (6)$$

式中: $P_{(ij)}$ 为不同年份不同区域气候调节总效益值,元; EB_{ij} 为不同年份不同区域气候调节效益能量,J; τ_s 为蒸发能值转化率,sej/J,取 $\tau_s = 12.2 \text{ sej}/\text{J}$ ^[13,17]; EDR_{ij} 为不同年份不同区域能值货币比率,sej/元; $P_{cr(ij)}$ 为不同年份不同区域气候调节单方水效益值,元/ m^3 ; W_{ij} 为不同年份不同区域的农田灌溉用水量, m^3 。

3 实例研究

3.1 研究区域概况

陕西省位于我国西北部,属于大陆季风性气候,根据地理气候可由北向南分为陕北、关中和陕南3大区域。由于横跨3个气候区,南、北气候之间存在显著差异,水资源分布不均衡,农作物种植结构差别较大。全省年平均气温由北到南逐渐升高,多年平均气温为 $5.9\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 15.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,季节和昼夜温差大;年平均降水量呈现明显的南多北少态势,全省多年平均降水量为 666.9 mm ,降水主要集中在7-8月份^[22];陕北和关中地区以种植旱作物为主,陕南地区以种植水稻为主。

水利灌溉事业的发展对我国农业生产具有举足轻重的作用,陕西省因其独特的地理位置与自然环境,在农业灌溉领域有着悠久的历史和丰富的经验。截止2018年底,全省大、中、小灌区共有187个,总

耕地面积 $301.466\times 10^4\text{ hm}^2$,总灌溉面积 $143.179\times 10^4\text{ hm}^2$,全年农田灌溉用水量 $47.21\times 10^8\text{ m}^3$,关中、陕北和陕南农田灌溉用水量分别占52.21%、10.15%和37.64%。

3.2 农田灌溉蒸散发量的估算

根据前文构造的农田灌溉蒸散发量估算模型可知,由于旱作物和水稻的灌溉水消耗途径不同,在估算农田灌溉蒸散发量时只考虑稻田排水量和渗漏量。陕西省水稻整个生长期在5月下旬至9月中旬,大约 115 d ^[23],再加上此前5~10d的泡田时间,共约120d。本文计算稻田渗漏量时,陕南地区平均渗漏量取 3.81 mm/d ,关中地区取 2.5 mm/d ,陕北地区取 4.9 mm/d ^[24]。水稻在分蘖期和黄熟前期控制水层在 $0\sim 40\text{ mm}$ ^[25],分蘖末期和黄熟期的排水量取 20 mm 。将上述数据代入公式(4),估算2008-2018年陕西省不同区域的农田灌溉蒸散发量,计算结果见表1。

表1 2008-2018年陕西省不同区域的农田灌溉蒸散发量

10^8 m^3

年份	关中				陕北				陕南			
	毛灌溉水量 W	净灌溉水量 I	渗漏排水量 M	蒸散发量 ET	毛灌溉水量 W	净灌溉水量 I	渗漏排水量 M	蒸散发量 ET	毛灌溉水量 W	净灌溉水量 I	渗漏排水量 M	蒸散发量 ET
2008	27.74	17.08	0.083	17.00	5.65	3.37	0.293	3.08	18.59	9.55	5.57	3.98
2009	27.64	17.05	0.084	16.97	5.16	3.06	0.275	2.78	18.72	9.67	5.81	3.86
2010	26.36	16.14	0.062	16.08	5.08	3.01	0.271	2.74	18.17	9.38	5.85	3.53
2011	26.18	16.01	0.054	15.96	5.07	2.99	0.189	2.80	18.77	9.71	5.41	4.30
2012	26.41	16.12	0.049	16.07	5.03	2.97	0.117	2.85	18.14	9.30	5.45	3.85
2013	26.10	16.01	0.042	15.97	5.38	3.20	0.108	3.09	18.10	9.21	5.45	3.76
2014	26.54	16.29	0.018	16.27	4.89	2.87	0.102	2.77	17.81	9.07	5.42	3.65
2015	26.12	15.98	0.005	15.97	4.86	2.86	0.109	2.75	17.83	8.98	5.41	3.57
2016	25.47	15.55	0.011	15.54	4.93	2.89	0.111	2.78	17.66	8.92	5.38	3.54
2017	25.70	15.71	0.033	15.68	4.99	2.95	0.119	2.83	17.78	8.87	5.32	3.55
2018	24.65	14.94	0.034	14.91	4.79	2.80	0.219	2.58	17.77	8.89	5.02	3.87

3.3 能值货币比率

在能值分析理论的基础之上,通过其基本操作流程与方式方法,收集并汇总陕西省各市、各地区社会经济和自然环境状况数据,借助相关的计算公式以及能值转换率,经过数据处理之后,编制出了相应的能值分析表。为了方便不同年份价值量的综合对比,消除价格变动的因素,本文选用2005年为基准期,以不变价计算经济数值,并选用国内生产总值指标替代国民生产总值指标。以2008年陕西省关中

地区为例进行计算,陕西省关中地区2008年水资源生态经济系统能值分析结果见表2。

根据能值分析表的能值流量指标,分别计算2008-2018年陕西省不同区域水资源生态系统的能值货币比率指标,计算结果汇总于表3。

3.4 农田灌溉气候调节效益估算

将上述计算得出的农田灌溉蒸散发量、能值货币比率和相关参数代入模型(5)和(6),分区域计算农田灌溉气候调节效益,计算结果见表4。

表 2 2008 年陕西关中地区水资源生态经济系统能值分析表

项目	数值	单位	能值转化率	单位	太阳能值	单位	
可更新资源(<i>N</i>)	太阳能	2.55	10^{20} J	1.00	sej/J	10^{20} sej	
	地表风能	6.27	10^{18} J	6.23	10^2 sej/J	10^{21} sej	
	雨水势能	2.90	10^{17} J	8.89	10^3 sej/J	10^{21} sej	
	雨水化学能	1.50	10^{17} J	1.54	10^4 sej/J	10^{21} sej	
	地球旋转能	5.54	10^{16} J	2.90	10^4 sej/J	10^{21} sej	
	合计					1.07	10^{21} sej
不可更新资源(<i>R</i>)	原煤	1.79	10^{18} J	3.98	10^4 sej/J	10^{22} sej	
	原油	1.40	10^{17} J	5.40	10^4 sej/J	10^{21} sej	
	铁矿石	0.00	g	8.60	10^8 sej/g	sej	
	天然气	2.21	10^{17} J	4.80	10^4 sej/J	10^{22} sej	
	发电量	1.82	10^{17} J	1.59	10^5 sej/J	10^{22} sej	
	钢材	4.47	10^{12} g	1.78	10^9 sej/g	10^{21} sej	
	水泥	2.92	10^{13} g	1.98	10^9 sej/g	10^{22} sej	
	化肥	1.17	10^{12} g	4.62	10^9 sej/g	10^{21} sej	
	合计					1.89	10^{23} sej
	进口资源(<i>IMP</i>)	商品	2.57	10^9 \$	2.50	10^{12} sej/\$	10^{21} sej
外商投资		1.15	10^9 \$	2.50	10^{12} sej/\$	10^{21} sej	
旅游收入		5.74	10^8 \$	2.50	10^{12} sej/\$	10^{21} sej	
合计						1.07	10^{22} sej
系统总投入能值($U = N + R + IMP$)					2.11	10^{23} sej	
国内生产总值(<i>GDP</i>)	5.49	10^{10} \$	8.67	10^{12} sej/\$	4.76	10^{23} sej	
能值货币比率($EDR = U/GDP$)					5.53	10^{11} sej/元	

表 3 2008 - 2018 年陕西省不同区域水资源生态系统主要能值指标汇总表

年份	关中			陕北			陕南		
	$U / 10^{23}$ sej	$GDP / 10^8$ 元	$EDR / 10^{11}$ (sej·元 ⁻¹)	$U / 10^{23}$ sej	$GDP / 10^8$ 元	$EDR / 10^{12}$ (sej·元 ⁻¹)	$U / 10^{22}$ sej	$GDP / 10^8$ 元	$EDR / 10^{11}$ (sej·元 ⁻¹)
2008	2.11	3811.74	5.53	3.20	1427.78	2.24	3.72	688.56	5.40
2009	5.54	4365.30	5.61	4.05	1610.90	2.52	4.95	788.77	6.27
2010	6.41	5002.08	5.64	4.85	1873.24	2.59	5.93	907.26	6.54
2011	3.41	5704.99	5.97	5.34	2122.85	2.52	7.08	1047.02	6.76
2012	4.10	6471.23	6.34	5.96	2364.53	2.52	7.60	1205.17	6.31
2013	4.50	7243.01	6.22	6.48	2550.48	2.54	8.25	1360.48	6.07
2014	4.59	7989.98	5.75	6.92	2751.33	2.52	8.23	1516.77	5.43
2015	4.66	8688.23	5.36	6.85	2836.35	2.42	8.69	1679.63	5.17
2016	4.30	9418.38	4.56	6.88	2963.16	2.32	7.98	1846.66	4.32
2017	4.37	10172.09	4.30	7.50	3198.69	2.35	10.03	2028.23	4.94
2018	4.21	10949.84	3.84	8.26	3487.78	2.37	9.52	2218.16	4.29

由于本文所计算的农田灌溉气候调节效益是通过蒸发量、蒸发潜热和能值货币比率来实现的(蒸发

量的大小主要取决于地区的灌溉用水量和种植结构;蒸发潜热的大小主要取决于地区的年平均温度;能值

货币比率的大小主要取决于各地区的资源利用程度和GDP高低)。因此,各地区的气候调节价值不同。根据表4绘制出的2008-2018年陕西省不同区域农

田灌溉气候调节效益对比图见图1。由图1可见,陕南、关中、陕北区域气候调节效益差异较大,关中地区气候调节价值最大,而陕北地区气候调节价值最小。

表4 2008-2018年陕西省不同区域的农田灌溉气候调节效益值

年份	总效益/10 ⁶ 元			单方水效益/(元·m ⁻³)		
	关中	陕北	陕南	关中	陕北	陕南
2008	92.6608	4.1538	22.2039	0.0334	0.0074	0.0119
2009	91.1322	3.3460	18.5066	0.0330	0.0065	0.0099
2010	85.9071	3.2010	16.2610	0.0326	0.0063	0.0089
2011	80.5130	3.3644	19.1404	0.0308	0.0066	0.0102
2012	76.4420	3.4231	18.3568	0.0289	0.0068	0.0101
2013	77.3447	3.6797	18.6269	0.0296	0.0068	0.0103
2014	85.2425	3.3264	20.2562	0.0321	0.0068	0.0114
2015	89.7590	3.4406	20.7889	0.0344	0.0071	0.0117
2016	102.5146	3.6199	24.6670	0.0402	0.0073	0.0140
2017	109.9046	3.6497	21.6333	0.0428	0.0073	0.0122
2018	116.8030	3.2957	27.1516	0.0474	0.0069	0.0153

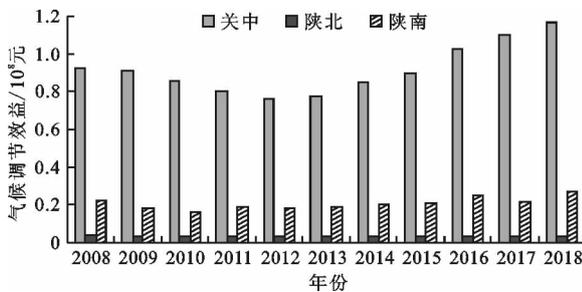


图1 2008-2018年陕西省不同区域农田灌溉气候调节效益对比图

关性分析,结果见表5。由表5可以看出:(1)陕南和关中各影响因素与气候调节效益的相关性基本一致,但陕南地区水稻的种植面积对气候调节效益影响较大,关中地区却不明显。这是由于陕南地区以种植水稻为主,关中地区几乎全部种植旱作物,稻田的渗漏量和排水量直接影响蒸发量,进而影响气候调节效益。说明气候调节效益与种植结构有关,种植结构不同导致气候调节效益不同;(2)陕南、关中地区与陕北地区各影响因素与气候调节效益呈相反关系,这是由湿润区域与干旱区域的气候条件不同而导致的气候调节效益不同;(3)能值货币比率对3个区域的气候调节效益的影响均较大,相关系数达到显著水平,说明能值货币比率是影响不同区域气候调节效益的直接因素。

3.5 农田灌溉气候调节效益影响因素分析

为探究不同区域气候调节效益的差异性,分别将灌溉用水量、稻田种植面积、年平均温度、蒸发能量和能值货币比率与不同区域气候调节效益进行相

表5 2008-2018年陕西省不同区域农田灌溉气候调节效益和各影响因素的相关系数

区域	项目	W	A _{稻田}	T	EN	EDR
陕南	皮尔逊相关性	-0.486	-0.799**	0.483	-0.028	-0.909**
	显著性(双尾)	0.129	0.005	0.133	0.935	0.000
陕北	皮尔逊相关性	0.742**	0.072	-0.18	0.782**	-0.709*
	显著性(双尾)	0.009	0.834	0.595	0.004	0.015
关中	皮尔逊相关性	-0.519	-0.242	0.320	-0.516	-0.989**
	显著性(双尾)	0.102	0.473	0.337	0.104	0.000

注:**表示在0.01级别(双尾)相关性显著。*表示0.05级别(双尾)相关性显著。

结合表3和4中的数据,分别绘制2008-2018年陕西省不同区域的气候调节单方水效益值与能值货币比率的变化趋势图,结果见图2,据此可以定量地分析陕西省各区域的社会、经济、环境的变化。由图2可以看出,区域气候调节单方水效益随着能值货币比率的增长而减小。它反映了每年资源利用程

度和经济发展程度的不同会导致货币购买力的不同。一般来说,能值货币比率越小,表明经济越发达,生活水平相对较高^[26]。总体来看,陕西省3大典型区域的农田灌溉气候调节单方水效益呈上升趋势,一定程度上体现了气候调节的货币价值与区域的经济发达程度呈正比关系。

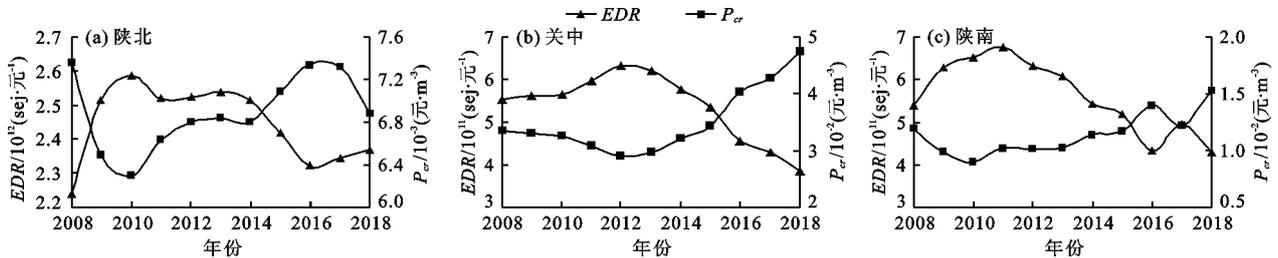


图2 2008-2018年陕西省不同区域农田灌溉气候调节单方水效益值和能值货币比率变化趋势

4 结论

综上所述,农田灌溉不仅可以带来粮食增产的直接经济效益,而且还产生了外部生态效益。本文依据农田灌溉水量、自然资源和在经济等数据,利用能值理论方法对陕西省3大区域农田灌溉气候调节效益进行估算,并得出以下结论:

(1) 关中农田灌溉气候调节效益最大,陕北农田灌溉气候调节效益最小。陕南、关中和陕北平均气候调节单方水效益分别约为0.011 0、0.035 0、0.006 9元/m³。

(2) 不同区域种植结构、灌溉用水量、经济发展水平程度等因素的不同会造成气候调节效益值的差异。基于各影响因素与气候调节效益相关显著性比较,得出能值货币比率是影响不同区域气候调节效益的关键要素。

(3) 2008-2018年陕西省3大区域农田气候调节单方水效益总体呈上升趋势,其中增长趋势最为明显的是关中区域,平均增长率为3.8%。气候调节效益的变化与当地每年的资源利用程度和经济发展程度紧密相关。

参考文献:

[1] 成波,李怀恩,徐梅梅. 西安市农业灌溉水效益分摊系数及效益的时间变化研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 244-248.

[2] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(15): 253-260.

[3] GILBERT A J, JANSSEN R. Use of environmental functions to communicate the values of a mangrove ecosystem

under different management regimes [J]. Ecological Economics, 1998, 25(3): 323-346.

[4] 相晨,严力蛟,韩轶才,等. 千岛湖生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3875-3884.

[5] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2091-2099.

[6] 王修信,胡玉梅,刘馨,等. 城市草地的小气候调节作用初步研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2007, 25(3): 23-27.

[7] 张灏,孔东升. 张掖黑河湿地国家级自然保护区气候调节功能价值评估[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 177-181+197.

[8] 肖强,肖洋,欧阳志云,等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 216-223.

[9] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.

[10] CAI Shizhen, ZHANG Xuliang, CAO Yinghui, et al. Values of the farmland ecosystem services of Qingdao City, China, and their changes [J]. Journal of Resources and Ecology, 2020, 11(5): 443-453.

[11] 刘利花,尹昌斌,钱小平. 稻田生态系统服务价值测算方法与应用——以苏州市域为例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(1): 92-99.

[12] 邱立波. 基于生态系统服务价值的灌区灌溉全成本水价核算方法研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.

[13] 尹越,陈菁,施红怡,等. 基于能值理论与稻田灌溉多功能性农业水价机制分析[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(11): 993-999.

[14] 李丽,王心源,骆磊,等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1233-1245.

(下转第242页)

蓄洪作用。一般蓄洪垸多考虑在不占用已有水系、农田和交通道路的前提下,疏通和扩挖渠系。蓄滞洪保留区应确保在行洪时分泄顺畅,降低堤垸的经济损失。

(3)钱粮湖垸、屈原垸和安澧垸连通优化后,河网密度、水系环度、节点连接率和水系连通度均有不同程度的提高,可有效增强农业灌溉和治涝行洪能力,进而保障堤垸防洪安全。

参考文献:

- [1] 张晓红. 三峡工程投运后长江蓄滞洪区规划建设建议[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 11-13.
- [2] 李宗礼, 刘晓洁, 田英, 等. 南方河网地区河湖水系连通的实践与思考[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2221-2225.
- [3] 张欧阳, 熊文, 丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 1-5.
- [4] VAN LOOY K, PIFFADY J, CAVILLON C, et al. Integrated modelling of functional and structural connectivity of river corridors for European otter recovery[J]. Ecological Modelling, 2014, 273: 228-235.
- [5] CUI Baoshan, WANG Chongfang, TAO Wendong, et al. River channel network design for drought and flood control: A case study of Xiaoqinghe River basin, Jinan City, China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11): 3675-3686.
- [6] 李普林, 陈菁, 孙炳香, 等. 基于连通性的城镇水系规划研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 31-35.
- [7] 徐光来, 许有鹏, 王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 776-781.
- [8] 孟慧芳, 许有鹏, 徐光来, 等. 平原河网区河流连通性评价

研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 626-631.

- [9] 余启辉, 要威, 宁磊. 长江中下游蓄滞洪区分类调整研究[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 48-51.
- [10] 冯畅, 毛德华, 李志龙, 等. 基于GIS的澧南垸分洪洪水三维可视化淹没模拟[J]. 中国农村水利水电, 2013(6): 113-116.
- [11] 毛德华, 蒋敏, 李正最, 等. 洞庭湖区蓄洪垸生态补偿机制研究——以澧南垸为例[J]. 武陵学刊, 2012, 37(6): 72-78.
- [12] 窦明, 靳梦, 张彦, 等. 基于城市水功能需求的水系连通指标阈值研究[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1089-1096.
- [13] 张嘉辉, 叶长青, 朱丽蓉, 等. 考虑水功能需求的海口市水系连通指标阈值研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 122-129.
- [14] 黄草, 陈叶华, 李志威, 等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 661-672.
- [15] 窦明, 张远东, 张亚洲, 等. 淮河流域水系连通状况评估[J]. 中国水利, 2013(9): 21-23.
- [16] 李原园, 杨晓茹, 黄火键, 等. 乡村振兴视角下农村水系综合整治思路与对策研究[J]. 中国水利, 2019(9): 29-32.
- [17] 要威. 新形势下长江蓄滞洪区建设与管理思考[J]. 长江技术经济, 2019, 3(2): 99-104.
- [18] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 湖南省洞庭湖区河湖连通工程汇报材料[R]. 长沙: 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 2016.
- [19] 湖南省洞庭湖水利工程管理局. 湖南省洞庭湖区河湖连通生态水利规划报告[R]. 长沙: 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 2017.
- [20] 方佳佳, 王烜, 孙涛, 等. 河流连通性及其对生态水文过程影响研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 19-26.

(上接第235页)

- [15] 宋子奇, 方国华, 闻昕, 等. 基于能值分析的跨流域引调水工程生态效益计算[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5): 46-51.
- [16] ODUM H T. Environmental accounting: EMERGY and environmental decision making[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [17] 吴泽宁, 吕翠美, 胡彩虹, 等. 水资源生态经济价值能值分析理论方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [18] 陆宏芳, 沈善瑞, 陈洁, 等. 生态经济系统的一种整合评价方法: 能值理论与分析方法[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 121-126.
- [19] 马国霞, 於方, 王金南, 等. 中国2015年陆地生态系统生产总值核算研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4):

1474-1482.

- [20] 姜会飞. 农业气象学(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [21] 俞双恩, 顾京, 郭杰, 等. 稻作区田间水利用系数的测定方法探讨[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(1): 5-8.
- [22] 郭梦, 张奇莹, 钱会, 等. 基于SPEI干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 127-132+138.
- [23] 樊晓玲, 张小峰. 2011年汉中市水稻全生育期气象条件分析[J]. 现代农业科技, 2012(18): 238+240.
- [24] 康绍忠, 贺正中, 张学. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [25] 李存, 晏成明. 灌溉排水工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [26] 师谦友, 王伟平. 陕西省生态经济系统的能值分析及其可持续发展评估[J]. 统计与决策, 2009(19): 119-122.