

近50年河套灌区种植系统演化分析*

曹连海^{1,2} 吴普特¹ 赵西宁¹ 王玉宝¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 华北水利水电大学资源与环境学院, 郑州 450045)

摘要: 以内蒙古河套灌区为研究对象,根据协同学支配原理,分别在作物种植系统资源环境、社会经济和种植结构子系统设置了序参量,利用基于协同学原理的种植系统演化特征识别模型,计算了河套灌区1960—2008年种植系统的有序度和协调度,分析了系统协调度变化规律,揭示了该系统的协同异化规律,提出了种植结构合理阈值区间。结果表明:种植系统协调度呈现波动性变化,但变化幅度不大,系统在2004年发生突变,系统异化特征明显;提出了作物种植比例合理阈值区间,粮食为(47.82%, 62.66%),经济作物为(24.64%, 43.49%)。

关键词: 河套灌区 种植结构 有序度 协调度 协同异化特征

中图分类号: S184 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0144-07

引言

灌区对于我国粮食安全有着举足轻重的作用,截止2011年底我国灌溉面积0.668亿hm²,其中耕地灌溉面积0.615亿hm²,占耕地总面积的50.5%^[1]。灌区种植系统与资源、生态环境和社会经济关系复杂,深入挖掘这种复杂关系内在的规律性,有助于探索种植结构的形成机制,探索种植结构调整的方向。灌区种植系统在演化过程中,与资源、生态环境和社会经济系统关系密切,它们既相互关联,又彼此独立,共同组成了灌区种植系统的结构演化体系。在以往的种植系统研究中^[2-4],人们多关注不同约束条件下的种植结构调整,而对种植系统演化过程缺乏清晰的认识,虽然研究成果众多,在实际农业生产中难以推广实施。实际上灌区种植系统有着复杂的演化过程,其结构调整也不是一蹴而就的事情,种植结构是诸多利益群体相互博弈的结果,受到经济效益、水土资源匹配、环境及气候变化的驱动和约束。

种植系统是典型的复合系统,由资源环境、社会经济和种植结构子系统组成,该系统结构复杂,作用方式多样,难以准确把握。其演化是各子系统长期演化和相互关系转化的结果,其演化特征是各子系统相互联系、相互制约和相互支持关系的集中体现,这种关系左右着系统相变特征和规律^[5]。若片面

强调某个子系统的价值,会导致子系统间发展不协调,反而使整个系统紊乱,甚至崩溃,只有各子系统协同才能促进整个系统协调发展。协同学的出现,为研究这种复杂关系和复合系统演化特征提供了很好的工具^[6-7]。以序参量原理和役使原理为基础的协同学协调度评价模型,通过构建同步协调方程,以实际发展轨迹和理想发展轨迹之间的空间距离来度量复合系统协调度方程,有效实现了复合系统协调发展的动态评价,为复合系统协调度评价提供了新的途径。

本文在同步协调方程的基础上,以种植系统空间直线代表理想发展轨迹,利用基于子系统有序度水平的种植系统演化协调度评价模型,研究内蒙古河套灌区种植系统协同异化特征演化规律,提出种植结构合理阈值区间,以丰富和完善灌区种植系统响应理论基础,探索种植结构调整的方向。

1 数据来源和方法

1.1 数据来源

内蒙古河套灌区位于内蒙古自治区西部,是中国三大灌区之一。灌区总土地面积119万hm²,设计灌溉面积73万hm²。研究使用的水文和水资源数据主要来源于《内蒙古河套灌区供排水运行管理统计资料汇编(1960年—2008年)》^[8],种植品种、

收稿日期: 2014-01-26 修回日期: 2014-03-06

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B09)、高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007)、国家自然科学基金资助项目(41105119)和2011年教育部人文社会科学研究一般项目(11YJCZH158)

作者简介: 曹连海,博士生,华北水利水电大学教授,主要从事水文水资源及水土保持研究, E-mail: caolianhai@ncwu.edu.cn

通讯作者: 吴普特,研究员,主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

面积和作物产量主要来源于《巴彦淖尔市统计年鉴(2000年—2010年)》^[9]。根据基础数据情况,确定时间序列跨度为1960—2008年,共49年(部分指标缺少1960年的数据,用插补方法补齐)。

1.2 子系统有序度

种植系统表示为 $S = \{S_1, S_2, S_3\}$, 其中 S_i 为第 i 子系统, $i = 1, 2, 3$; 设 x_{ij} 为子系统 S_i 第 j 个序参量, x_{ij} 的值在临界阈值区间 $[\alpha_{ij}, \beta_{ij}]$, 如果 x_{ij} 的值越大越优, 其就是正序参量, 有序度^[5, 10-11] μ_{ij} 表示为

$$\mu_{ij} = \frac{x_{ij} - \alpha_{ij}}{\beta_{ij} - \alpha_{ij}} \tag{1}$$

如果 x_{ij} 的值越小越优, 其就是逆序参量, 有序度 μ_{ij} 表示为

$$\mu_{ij} = \frac{\beta_{ij} - x_{ij}}{\beta_{ij} - \alpha_{ij}} \tag{2}$$

如果子系统 S_i 有 n 个序参量, 其有序度 μ_i 表示为

$$\mu_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j \mu_{ij} \tag{3}$$

式中 λ_j 为 x_{ij} 的权系数, $\lambda_j \geq 0, \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ 。

1.3 系统协调度

从协同学的角度看, 协调是系统组成要素之间在发展过程中彼此之间的和谐一致, 这种和谐一致的程度称为系统协调度^[5, 10-13]。若评价特定时段起点 t_0 对应的理想点为 O , 评价特定时段 t 的理想终点为 P , 则直线 OP 表示为该时期河套灌区种植系统理想发展轨迹。如果灌区种植系统发展方向完全与 OP 吻合, 则说明系统处于理想的发展轨迹, 完全协调。实际上, 由于系统在发展过程中, 诸多影响因素的交互作用, 通常不与 OP 吻合。由于无法准确定位 P 点的坐标, 只能从 P 点对应于系统实际轨迹 P' 表征 P 点坐标, 若 P' 的坐标为 $(\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t))$, 则

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_1(t) + \mu_2(t) + \mu_3(t)}{3} \tag{4}$$

P 点坐标就可以表示为 $(\bar{\mu}, \bar{\mu}, \bar{\mu})$ 。 P' 偏离直线 OP 的空间距离 $d(t)$ 表示为

$$d(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (\mu_i(t) - \bar{\mu})^2}{3}} \tag{5}$$

用 $d(t)$ 归一化后的量值 $c(t)$ 衡量 t 时段种植系统的协调度, $c(t)$ 表示为

$$c(t) = 1 - d(t) \tag{6}$$

$c(t)$ 越大, 表明系统协调程度越高; 反之则越低。可见, 根据不同时期灌区种植系统协调度函数

$c(t)$ 的大小, 可以判断种植系统的相变特征, 由此揭示种植系统的演化机制。一般情况下, 协调度在 0.9~1.0 之间, 系统高度协调; 协调度在 0.8~0.9 之间, 系统良好协调; 协调度在 0.65~0.8 之间, 系统协调; 协调度在 0.5~0.65 之间, 系统弱协调; 协调度小于 0.5, 系统不协调^[14]。

1.4 序参量的选择

分析灌区种植系统演化规律就是研究不同时期资源环境、社会经济和种植结构 3 个子系统序参量的协调度, 系统的序参量就是决定系统相变进程的根本变量或者说在系统发展演变过程中起决定作用的因素。序参量数量较少, 衰减变化较慢, 但却主宰着整个系统演变的方向, 决定系统的有序状态。系统从无序走向有序的机制关键在于系统内部序参量之间的协同作用, 它左右着系统相变的特征与规律。灌区种植系统复杂, 根据其特点和序参量的概念选择序参量。

1.4.1 资源环境子系统

灌区是水-土资源高度匹配的农产品生产区, 水-土资源相互匹配和相互制约的特点^[15], 构造了资源环境子系统的结构和转换关系, 综合考虑资源环境子系统自然属性和社会属性, 选用水足迹利用率、环境用水保证率和水资源-耕地基尼系数作为资源环境子系统序参量。

(1) 水足迹^[16] 利用率计算公式为

$$W_{ue} = \frac{W_{blue} + W_{green}}{Q + W_{green}} \tag{7}$$

式中 W_{ue} ——水足迹利用率, %

W_{blue} ——农业生产蓝水足迹^[17], m^3

W_{green} ——农业生产绿水足迹^[18], m^3

Q ——河套灌区净引黄河水量, m^3

(2) 环境用水保证率计算公式为

$$\eta_e = \frac{Q_{au}}{Q_{au} + W_{grey}} \times 100\% \tag{8}$$

式中 η_e ——环境用水保证率, %

Q_{au} ——河套灌区秋浇用水量, m^3

W_{grey} ——农业生产灰水足迹^[19], m^3

(3) 水资源-耕地基尼系数^[20] 计算公式为

$$G = 1 - \sum_{i=1}^3 (X_i - X_{i-1})(Y_i - Y_{i-1}) \tag{9}$$

式中 G ——水资源-耕地基尼系数

X_i ——粮食作物、经济作物和林牧占用农业水资源的累计百分比

Y_i ——粮食作物、经济作物和林牧占用土地资源资源的累计百分比

i ——作物类型, $i = 1$ 时, $(X_{i-1}, Y_{i-1}) = (0, 0)$

1.4.2 社会经济子系统

灌区作为重要的农作物种植区,其社会经济子系统的发展主要体现在生产效率的提高和资源消耗的减小;因此,选用粮食单产增产率和粮食生产水足迹作为社会经济子系统的序参量。1960—2008 年间,河套灌区种植的农作物品种有十余种,大面积种植且种植面积变化不大的只有小麦,而小麦又一直是河套地区的主要口粮作物。因此,在序参量的计算中,选择小麦作为代表性作物^[21]。

(1)粮食单产增产率计算公式为

$$\rho = \frac{D_{t+1} - D_t}{D_t} \times 100\%$$

式中 ρ ——粮食单产增产率, %

D_{t+1} ——第 $t + 1$ 年的小麦单产, kg/hm²

D_t ——第 t 年的小麦单产, kg/hm²

(2)粮食生产水足迹^[18]是生产单位粮食所消耗的水足迹数量,计算公式为

$$W_g = \frac{W_{blue} + W_{green}}{AD}$$

式中 W_g ——粮食生产水足迹, m³/kg

D ——小麦单产, kg/hm²

A ——农作物种植面积, hm²

1.4.3 种植结构子系统

近 50 年来河套灌区种植结构发生了深刻的变化,在粮食作物中水稻、高粱、谷子等品种逐渐消失,夏杂和秋杂种植面积萎缩很快,而玉米的种植面积却增加了 3 倍;在经济作物中,增加了瓜类、番茄、甜菜和葵花等品种,种植面积增加较快。河套灌区居

民的口粮作物以小麦为主,杂粮为辅;动物饲料 1995 年之前以牧草为主,1995 年之后以牧草和玉米为主;因此,将粮食作物分为口粮作物和饲料粮食作物。根据河套灌区种植结构特点,选择粮食自给系数、经济作物百分比和口粮自给系数作为序参量。

(1)粮食自给系数计算公式为

$$\mu_g = \frac{Q_{gp}}{Q_{gr}}$$

式中 μ_g ——粮食自给系数

Q_{gp} ——粮食生产量, kg

Q_{gr} ——粮食需要量, kg

(2)经济作物百分比计算公式为

$$\mu_e = \frac{F_{ep}}{F_{ap}} \times 100\%$$

式中 μ_e ——经济作物百分比, %

F_{ep} ——经济作物种植面积, hm²

F_{ap} ——农作物种植面积, hm²

(3)口粮自给系数计算公式为

$$\mu_p = \frac{Q_{fp}}{Q_{fr}}$$

式中 μ_p ——口粮自给系数

Q_{fp} ——口粮生产量, kg

Q_{fr} ——口粮需要量, kg

1.4.4 序参量阈值

序参量的上下阈值范围是指该参量的最理想和最不理想的状态,参考发达国家经验和前人的研究成果确定^[22-27]。种植系统序参量 5 级阈值区间见表 1。

表 1 种植系统序参量 5 级阈值区间

Tab.1 Threshold of order parameters in the plantation system

子系统	序参量	类型	I	II	III	IV	V
资源环境子系统	水足迹利用率/%	逆	>85	75~85	65~75	55~65	<55
	环境用水保证率/%	正	<50	50~65	65~80	80~95	>95
	水资源-耕地基尼系数	逆	>0.6	0.4~0.6	0.3~0.4	0.2~0.3	<0.2
社会经济子系统	粮食单产增产率/%	正	<-15	-15~-4	-4~4	4~15	>15
	粮食生产水足迹/(m ³ ·kg ⁻¹)	逆	>12	8~12	3~8	0.6~3	<0.6
	粮食自给系数	正	<1	1~2	2~3	3~4	>4
种植结构子系统	经济作物百分比/%	逆	>60	35~60	15~35	5~15	<5
	口粮自给系数	正	<1	1~2	2~3	3~4	>4

2 结果与分析

2.1 计算结果

利用上文的方法计算 1960—2008 年序参量的值,资源环境和种植结构子系统取 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1/3$,社会经济子系统取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$,利用式(1)~(3)计算各序参量的有序度和各子系统的有序度。

利用式(4)确定 P 点的坐标,按照式(5)和式(6)得到各年份的 $d(t)$ 和 $c(t)$ 值,计算结果见表 2。

2.2 资源环境子系统演化特征分析

2.2.1 序参量变化趋势分析

近 50 年来,河套灌区水足迹利用率基本稳定在 70% 左右,但也有逐渐减小的趋势,从 1960 年的 77.64% 减小到 2008 年的 63.63%,说明随着河套

表 2 种植系统子系统有序度和协调度

Tab.2 Order degrees and coordinating degrees of the plantation system

年份	资源环境子系统				社会经济子系统			种植结构子系统				协调度
	$W_{ue}/\%$	$\eta_e/\%$	G	有序度	$\rho/\%$	$W_g/(\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	有序度	μ_g	$\mu_e/\%$	μ_p	有序度	
1960	77.64	76.61	0.27	0.603	-5.60	9.13	0.79	1.04	6.79	1.59	0.484	0.874
1965	68.01	72.34	0.24	0.596	7.63	5.59	0.41	1.27	4.96	1.77	0.349	0.895
1970	71.45	68.73	0.21	0.501	-10.86	10.10	0.35	0.68	4.40	0.89	0.563	0.911
1975	78.08	65.68	0.22	0.513	10.42	7.05	0.39	0.98	3.96	1.32	0.503	0.944
1980	67.25	64.20	0.22	0.841	3.89	6.01	0.69	0.98	11.18	1.30	0.554	0.883
1985	71.82	67.15	0.51	0.304	12.08	4.47	0.72	1.38	25.13	1.65	0.508	0.830
1990	70.82	54.67	0.50	0.410	5.68	3.52	0.52	1.85	24.64	2.10	0.489	0.954
1995	68.18	89.76	0.52	0.578	3.82	2.47	0.60	2.16	27.62	2.47	0.333	0.879
2000	70.56	60.20	0.55	0.458	2.06	1.30	0.73	2.10	40.02	2.48	0.460	0.872
2004	64.15	69.08	0.57	0.169	1.37	1.10	0.73	2.43	43.49	2.85	0.647	0.753
2008	63.63	89.25	0.55	0.335	2.02	1.05	0.78	2.81	55.39	3.28	0.425	0.808

灌区种植结构的调整,农业生产消耗的水足迹占农业水资源的比例在减小,灌区农业节水潜力在增加。以 2008 年为例,河套灌区从黄河净引水量为 44.661 亿 m^3 ,灌域有效降水量为 11.055 亿 m^3 ,灌区水足迹总量为 55.716 亿 m^3 ;农业生产水足迹总量为 35.45 亿 m^3 ,秋浇用水量为 15.158 亿 m^3 ,灰水足迹 1.83 亿 m^3 ,无效用水量达到了 3.278 亿 m^3 ,这部分水就是河套灌区 2008 年的节水潜力。环境用水保证率变化情况可以分成两个阶段,1960—1990 年环境用水保证率逐步下降,从 1960 年的 76.61% 减小到 1990 年的 54.67%;1990—2008 年环境用水保证率呈现波动性变化,说明河套灌区农业生产过程中,越来越关注环境。水资源-耕地基尼系数可以分为两个阶段:第一阶段为 1960—1980 年,基尼系数在 0.21~0.27 之间,不同类型农作物占用的耕地资源和农业水资源是基本匹配的;这一阶段粮食作物种植面积占总耕地面积比例在 80% 以上,占用农业水资源的比例也在 80% 以上,经济作物和林牧的种植比例和占用农业水资源的比例维持在较低的水平;第二阶段是 1985—2008 年,基尼系数大于 0.5,并呈逐年增加的趋势,不同类型农作物占用的耕地资源和农业水资源是高度不平均的,粮食作物的种植比例小于占用农业水资源的比例。以 2008 年为例,粮食作物的种植比例为 38.01%,而占用农业水资源的比例为 43.54%;经济作物的种植比例为 55.39%,而占用农业水资源的比例为 50.20%。

2.2.2 子系统演化特征分析

子系统的有序度 1980 年为极大值,2004 年为极小值,其他年份基本稳定在 0.3~0.6 之间。1980 年是以家庭承包经营为基础、统分结合的双层经营体制改革效果显现的一年,农民有了自主经营权,经济作物的种植面积增加到 4.63 万 hm^2 ,为 1975 年

的 2.6 倍;林牧的种植面积大幅减少,仅为 1975 年的 28%;粮食作物的种植面积为 35.47 万 hm^2 ,比 1975 年减少 3.32 万 hm^2 ;种植业占用的耕地面积比 1975 年减少 3.77 万 hm^2 ,消耗的水足迹总量比 1975 年减小 1.15 亿 m^3 ;粮食产量比 1975 年增加 2.14 万 t,农业总产值比 1975 年增加 1.91 亿元(1990 年不变价格);子系统在 1980 年处于有序状态。1980—2003 年农村经营体制基本上没有大的变化,农村居民人均年纯收入与城市居民差距逐年拉大,二者之比 1980 年为 0.65,2003 年为 0.43,加之农村年轻农民到城市里打工,农业生产以老人、妇女和儿童为主,农民需要缴纳村提留、农业税等,出现了大量撂荒耕地。2004 年与 2000 年相比,农作物播种面积减少 1.79 万 hm^2 ,粮食种植面积减少 2.1 万 hm^2 ,农作物消耗的总水足迹减少 8.08 亿 m^3 ;子系统在 2004 年处于无序状态,正是这种状况的真实体现。2004 年免征农业税改革后,子系统有序度又逐步恢复。

一般情况下,有序度小于 0.2,就认为灌区水土资源匹配合理;有序度在 0.2~0.4 之间,就认为灌区水土资源匹配基本合理;有序度在 0.4~0.6 之间,认为是灌区水土资源匹配基本不合理;有序度大于 0.6 之间,就认为灌区水土资源匹配不合理^[20]。因此 2004 年子系统水土资源匹配合理。

2.3 社会经济子系统演化特征分析

2.3.1 序参量变化趋势分析

近 50 年来河套灌区粮食单产逐步提高,1975 年前粮食单产波动性较大,减产年份较多,粮食单产增长以恢复性增长为主;1975—1985 年,粮食单产增长以波动性增长为主;1985 年以后,粮食单产年年增加,但增产率逐步减小,说明粮食增产潜力在逐步减小。粮食生产水足迹呈现波动性减小的过程,

生产每千克粮食的耗水量从 1970 年 10.10 m^3 减少到 2008 年的 1.05 m^3 , 说明河套灌区水分生产率逐步提高。

2.3.2 子系统演化特征分析

1965—1975 年, 子系统有序度小于 0.5, 子系统处于无序状态; 1980—2008 年, 子系统有序度介于 $0.52 \sim 0.78$ 之间, 子系统处于基本有序或有序状态; 总体来看, 1965—2008 年子系统有序度增大趋势明显, 子系统逐步由无序走向有序。

2.4 种植结构子系统演化特征分析

2.4.1 序参量变化趋势分析

1960—1965 年, 灌区粮食自给有余, 口粮也能够满足需要; 1970—1980 年, 灌区的粮食不能满足需要, 1970 年缺口最大, 口粮不能自给; 1985—2008 年, 灌区粮食和口粮自给有余, 外售粮食的数量逐年提高, 在 2008 年达到最大; 主要原因: 一是随着灌区社会经济发展水平的提高, 人均消耗粮食数量在减少。1990 年灌区农村居民年均消耗粮食 262 kg/人 , 城市居民年均消耗粮食 133.9 kg/人 , 到 2008 年灌区农村居民年均消耗粮食 218 kg/人 , 城市居民年均消耗粮食 106.6 kg/人 。二是粮食单产提高增加了粮食供给总量。粮食单产 1980 年为 $1\,729.74\text{ kg/hm}^2$, 1990 年为 $4\,033.73\text{ kg/hm}^2$, 2008 年为 $5\,532.28\text{ kg/hm}^2$; 2000 年小麦的种植面积仅为 1990 年的 88.5%, 而产量却是 1990 年的 106.82%。灌区经济作物的种植比例变化较大, 大致可以分为 3 个阶段: 1980 年之前种植比例不足 10%, 为第 1 阶段; 1980 年到 2000 年, 种植比例在 10%~30% 之间, 为第 2 阶段; 第 3 阶段是 2000 年之后, 种植比例超过 40%。

2.4.2 子系统演化特征分析

近 50 年来子系统有序度基本稳定在 $0.33 \sim 0.65$ 之间, 在大部分年份中小于 0.5, 处于无序状态。有序度最大的年份是 2004 年, 说明在 2004 年种植结构较优, 粮食、经济和林牧农作物种植比例较为合理。

2.5 系统协调度及其协同演化特征演化规律

从河套灌区种植系统协调度计算值来看, 近 50 年间种植系统协调度呈现波动性变化, 但变化幅度不大。1990 年的系统协调度最大, 系统处于高度协调水平; 而 1990 年 3 个子系统的有序度在该子系统中并不是最有序的。2004 年的系统协调度最小, 系统处于协调水平。系统在 2004 年发生突变, 表明在 2004 年前后, 河套灌区种植系统异化特征明显。2004 年前, 灌区种植系统达到平衡, 资源环境、社会经济和种植结构子系统相互依存, 系统协调度较高。2004 年以后, 系统协调度变小, 是我国农业产业政

策和水资源管理发生改变后共同作用的结果。近 50 年中国农业产业政策经历两次大的变动, 第 1 次是 1978 年实施联产承包责任制, 第 2 次是 2004—2006 年实施粮食补贴政策和取消农业税。以 1999 年 3 月黄河水利委员会统一调度黄河水量为分界点, 将黄河水资源管理分为两个阶段, 1999 年以后黄河水资源管理较以前更加严格。河套灌区种植系统协调度在 2004 年发生突变, 是中国农业产业政策和水资源管理双重作用的结果。

2.6 合理种植结构阈值的确定

在资源环境子系统, 2004 年的有序度值最小, 水土资源匹配合理; 在社会经济子系统中, 1980—2008 年有序度值比较稳定; 在种植结构子系统中, 有序度最大的年份是 2004 年, 种植结构比较合理; 在种植系统中, 协调度最高的年份是 1990 年, 最低的年份是 2004 年; 因此, 可以将 1990 年和 2004 年的种植比例看作种植结构上下阈值。实际上, 1990 年粮食作物的种植比例为 62.66%, 经济作物的种植比例为 24.64%; 2004 年粮食作物的种植比例为 47.82%, 经济作物的种植比例为 43.49%; 故粮食作物种植比例的阈值区间为 (47.82%, 62.66%), 经济作物种植比例的阈值区间为 (24.64%, 43.49%)。在这个阈值区间内, 灌区的水土资源匹配较为合理, 环境压力较小, 种植系统处于高度协调或协调水平。

3 结论

以内蒙古河套灌区为研究区, 提出了 3 个子系统的序参量: 水足迹利用率、环境用水保证率、水资源—耕地基尼系数、粮食单产增产率、粮食生产水足迹、粮食自给系数、经济作物百分比和口粮自给系数, 并给出 5 级阈值区间, 研究河套灌区 1960—2008 年种植系统的协同演化规律:

(1) 资源环境子系统的有序度 1980 年为极大值, 2004 年为极小值, 其他年份基本稳定在 $0.3 \sim 0.6$ 之间, 灌区的水土资源匹配逐步合理。社会经济子系统 1965—1975 年有序度小于 0.5, 子系统处于无序状态; 1980—2008 年, 子系统有序度介于 $0.52 \sim 0.78$ 之间, 子系统处于基本有序或有序状态。种植结构子系统有序度基本稳定在 $0.33 \sim 0.65$ 之间, 有序度最大的年份是 2004 年, 其他大部分年份小于 0.5, 处于无序状态。

(2) 种植系统协调度呈现波动性变化, 但变化幅度不大, 最大值是 1990 年的 0.954, 最小值是 2004 年的 0.753。2004 年前, 灌区种植系统达到平衡, 资源环境、社会经济和种植结构子系统相互依

存,系统协调度较高。2004年以后,系统协调度变小,是中国农业产业政策和水资源管理发生改变后共同作用的结果。系统在2004年发生突变,表明在2004年前后系统发生明显变异,系统异化特征明显。

(3) 综合考虑种植系统协调度和子系统有序

参 考 文 献

- 1 姚宛艳,徐海洋,郭群善,等. 灌区专项普查数据简析[J]. 中国水利,2013,(7):18-19.
- 2 王玉宝. 节水型农业种植结构优化研究——以黑河流域为例[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.
Wang Yubao. Optimization for water-saving crop planning and its application in Heihe river basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 3 陈兆波. 基于水资源高效利用的塔里木河流域农业种植结构优化研究[D]. 北京:中国农业科学院,2008.
Chen Zhaobo. Study on the agriculture planting structure optimization based on the high efficient utilization of water resources in tarim watershed[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2008. (in Chinese)
- 4 王婧. 中国北方地区节水农作制度研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2009.
Wang Jing. Studies on water-saving farming systems in northern part of China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 5 刘丙军,陈晓宏,雷洪成,等. 流域水资源供需系统演化特征识别[J]. 水科学进展,2011,22(3):331-336.
Liu Bingjun, Chen Xiaohong, Lei Hongcheng, et al. Distinguishing of water resources supply and demand system evolution features [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 331-336. (in Chinese)
- 6 哈肯 H. 高等协同学[M]. 郭治安,译. 北京:科学出版社,1989.
- 7 范斐,孙才志,王雪妮. 社会、经济与资源环境复合系统协同进化模型的构建及应用——以大连市为例[J]. 系统工程理论与实践,2013,23(2):413-419.
Fan Fei, Sun Caizhi, Wang Xueni. Social, economic and resource environment composite system of co-evolution-case of Dalian [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 23(2): 413-419. (in Chinese)
- 8 武银星,秦景和. 内蒙古河套灌区供排水运行管理统计资料汇编(1960年—2008年)[R]. 巴彦淖尔:内蒙古河套灌区,2009.
- 9 巴彦淖尔市统计局. 巴彦淖尔市统计年鉴(2000年—2010年)[M]. 巴彦淖尔市:巴彦淖尔市统计局,2000-2010.
- 10 樊华,陶学禹. 复合系统协调度模型及其应用[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(4):515-520.
Fan Hua, Tao Xueyu. Model of composite system coordinating degree and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(4): 515-520. (in Chinese)
- 11 孟庆松,韩文秀. 复合系统协调度模型研究[J]. 天津大学学报,2000,33(4):444-446.
Meng Qingsong, Han Wenxiu. Study of the coordinating measurement model with respect to composite system[J]. Journal of Tianjin University, 2000, 33(4): 444-446. (in Chinese)
- 12 汤铃,李建平,余乐安,等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(4):594-602.
Tang Ling, Li Jianping, Yu Lean, et al. Quantitative evaluation methodology for system coordination development based on distance coordination degree model[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2010, 30(4): 594-602. (in Chinese)
- 13 雷社平,解建仓,黄明聪,等. 区域产业用水系统的协调度分析[J]. 水利学报,2004(5):14-19.
Lei Sheping, Xie Jiancang, Huang Mingcong, et al. Coordination degree analysis of regional industry water use system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(5):14-19. (in Chinese)
- 14 肖燕,刘凌. 流域复合系统协调度的评价方法研究[J]. 水电能源科学,2009,27(3):15-17.
Xiao Yan, Liu Ling. Study on evaluation method of basin complex system coordinating degree[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(3): 15-17. (in Chinese)
- 15 王丽霞,任志远,任朝霞,等. 陕北延河流域基于GLP模型的流域水土资源综合配置[J]. 农业工程学报,2011,27(4):48-53.
Wang Lixia, Ren Zhiyuan, Ren Zhaoxia, et al. Integrated allocation of water and land resources based on GLP model in Yanhe watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 48-53. (in Chinese)
- 16 Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of water: sharing the planet's freshwater resources[M]. Oxford UK: Blackwell Publishing, 2008.
- 17 吴普特,王玉宝,赵西宁. 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告(2011)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- 18 Sun S, Wu P, Wang Y, et al. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 444: 498-507.
- 19 曹连海,吴普特,赵西宁,等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报,2014,30(1):63-72.

Cao Lianhai, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Evaluation of the grey water footprint of grain production in the Hetao irrigation district, inner Mongolia, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 30(1): 63 – 72. (in Chinese)

20 刘德地,陈晓宏. 一种区域用水量公平性的评估方法[J]. 水科学进展, 2008,19(3):268 – 272.
Liu Dedi, Chen Xiaohong. Method for evaluating the fairness of water use in Guangdong province[J]. Advances in Water Science, 2008,19(2): 268 – 272. (in Chinese)

21 蒙继华,吴炳方,李强子. 全国农作物叶面积指数遥感估算方法[J]. 农业工程学报,2007,23(2):160 – 167.
Meng Jihua, Wu Bingfang, Li Qiangzi. Method for estimating crop leaf area index of China using remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 160 – 167. (in Chinese)

22 吴普特. 中国旱区农业高效用水技术研究与实践[M]. 北京:科学出版社,2011.

23 郑文钟,何勇. 基于粗糙集的粮食产量组合预测模型[J]. 农业机械学报,2005,36(11):75 – 78.
Zheng Wenzhong, He Yong. Study on integrated forecasting methods for grain yield based on rough set theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 75 – 78. (in Chinese)

24 李全起,陈雨海,周勋波,等. 不同种植模式麦田水资源利用率及边际效益分析[J]. 农业机械学报,2010,41(7):90 – 95.
Li Quanqi, Chen Yuhai, Zhou Xunbo, et al. Effects of different planting patterns on water use efficiency and marginal profits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 90 – 95. (in Chinese)

25 陈百明,周小萍. 中国粮食自给率与耕地资源安全底线的探讨[J]. 经济地理,2005,25(2):145 – 148.
Chen Baiming, Zhou Xiaoping. Analysis on the grain self - sufficient ratio and the safe baseline of cultivated land in China[J]. Economic Geography, 2005, 25(2): 145 – 148. (in Chinese)

26 田园宏,诸大建,王欢明,等. 中国主要粮食作物的水足迹值:1978—2010[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(6):122 – 128.
Tian Yuanhong, Zhu Dajian, Wang Huanming, et al. Water footprint calculation of China's main food crops: 1978—2010[J]. China Population Resources and Environment, 2013, 23(6): 122 – 128. (in Chinese)

27 Mekonnen M M,Hoekstra A Y. A global and high resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(7): 1259 – 1270.

Plantation System Evolution Analysis of Hetao Irrigation District in Recent 50 Years

Cao Lianhai^{1,2} Wu Pute¹ Zhao Xining¹ Wang Yubao¹

(1. School of Resource and Environment Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. School of Resource and Environment Science, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Hetao irrigation district in Inner Mongolia was selected as the study site. The domination principle of synergetic was used for analysis. Order parameters were established in three subsystems of the plantation system: resources environment, socio-economic and plantation structure subsystem, respectively. The order degree and coordination degree of the system from 1960 to 2008 were calculated by a system identification model based on synergetic theory. Furthermore, the changes on the coordinating degree were analyzed as well as the synergy and difference features. The threshold values were then put forward for informing reasonable plantation structure. The results show that the coordination degree of the plantation system presents fluctuation changes, but the changes are relatively low. Particularly, a break occurred in 2004 and shows significantly difference characteristics. Finally, a reasonable threshold interval of proportion for crop plantation was put forward. It is grain (47.82%, 62.66%) and economic crops (24.64%,43.49%).

Key words: Hetao irrigation district Plantation structure Order degree Coordinating degree Synergetic and difference features