

黑龙江省灌溉水利用率分形特征与影响因素分析

付强 刘巍 刘东 李天霄 崔嵩

(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 黑龙江省不同类型灌区发展不均衡,致使多年来黑龙江省灌溉水利用率普遍低于全国平均水平,为实现黑龙江省灌溉水利用率均衡稳步提升,本文对黑龙江省不同类型灌区灌溉水利用率年度分形特征进行研究,利用位序-规模法对黑龙江省样点灌区灌溉水利用率的分形特征进行分析,并利用主成分分析法对黑龙江省灌溉水利用率的影响因素进行识别。结果表明:2009—2014年黑龙江省灌溉水利用率年度分维值 D 在 5.26 ~ 6.25 区间内,且呈现出由多分形向单分形逐步过渡的结构特点,表明黑龙江省不同类型灌区的灌溉水利用率有逐渐趋于均衡分布的态势;不同类型灌区灌溉水利用率在均衡发展情况下的最大值分别为:大、中型灌区 $D_1 = 4.58$ 时, $\eta_1 = 44.44\%$, 小型灌区 $D_2 = 4.79$ 时, $\eta_2 = 53.81\%$; 纯井灌区 $D_3 = 6.98$ 时, $\eta_3 = 70.41\%$; 全省灌区 $D = 5.13$ 时, $\eta = 57.03\%$; 渠系衬砌率和灌区工程配套率对大、中型灌区灌溉水利用率的影响程度远高于其他因素,小型灌区渠系衬砌率影响程度最大,蒸发蒸腾比影响程度最小;田间渗漏量对纯井灌区的灌溉水利用率影响程度最大。

关键词: 灌溉水利用率; 黑龙江省; 分形理论; 位序-规模法; 影响因素; 主成分分析

中图分类号: S274 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)09-0147-07

Fractal Characteristics and Influence Factors Analysis of Irrigation Water Use Efficiency in Heilongjiang Province

Fu Qiang Liu Wei Liu Dong Li Tianxiao Cui Song

(College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to investigate the fractal characteristics and influence factors of irrigation water use efficiency in different scales irrigation areas, the measuring results of irrigation water use efficiency in 115 different scales irrigation area were selected as samples during 2009—2014. The fractal characteristics of above samples were studied by using the method of rank - size distribution, and the influence factors of irrigation water use efficiency of Heilongjiang province were analyzed by using principal component analysis. The result showed that the fractal dimension value D of irrigation water use efficiency of Heilongjiang province was ranged in 5.26 ~ 6.25 in 2009—2014, and the distribution of irrigation water use efficiency changed from multi-fractal structure to single fractal structure. For the large-middle scale irrigation area ($D_1 = 4.58$), irrigation water use efficiency was the maximum of 44.44%. For the miniature irrigation area ($D_2 = 4.79$), irrigation water use efficiency was the maximum of 53.81%. For the pure well irrigation area ($D_3 = 6.98$), irrigation water use efficiency can reach maximum of 70.41%. For the whole province ($D = 5.13$), irrigation water use efficiency can reach maximum value of 57.03%. In the influence factors analysis for irrigation water use efficiency of different scales irrigation area, the channel lining rate and engineering equipment rate were the most two influential factors to irrigation water use efficiency of large-middle scale irrigation area. To miniature irrigation area, the influence of the channel lining rate was the most, and the influence of the ratio of evaporation to

收稿日期: 2016-03-12 修回日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479032, 51279031, 51579044)、黑龙江省高校长江学者后备支持计划项目和黑龙江省水利厅科技项目(201318, 201503)

作者简介: 付强(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源系统分析研究, E-mail: fuqiang0629@126.com

transpiration was the least. Field leakage was the most influential factor to irrigation water use efficiency of pure well irrigation area. The research results provided a theoretical basis for the balanced promotion of irrigation water use efficiency in Heilongjiang province.

Key words: irrigation water use efficiency; Heilongjiang province; fractal theory; rank-size method; influence factor; principal component analysis

引言

灌溉水利用率是评价灌区灌溉水利用情况的重要依据,是反映灌区灌溉工程状况、用水管理水平及灌溉技术水平的重要指标。正确评价灌溉用水效率可为灌区节水灌溉的发展提供科学的理论基础^[1-2]。由于受到人为等因素的影响,使得不同类型灌区灌溉水利用率的发展不均衡,因此,探寻灌溉水利用率的变化趋势可为不同类型灌区灌溉水利用率的均衡提升提供理论参考^[3-5]。

黑龙江省作为我国重要的商品粮基地,多年来其灌溉水利用率均低于全国平均水平^[6]。目前黑龙江省有大、中型灌区 338 个,小型灌区 9 136 个,纯井灌区 30 万余个,环境差异及管理方式的不同使得不同类型灌区的灌溉水利用率差异显著^[7-8]。因此,有必要分析黑龙江省不同类型灌区灌溉水利用率的变化规律,并找出制约不同类型灌区的主要影响因素,使得不同类型灌区在其可达到的阈值范围内得以提升,进而实现黑龙江省灌溉水利用率均衡增长。

目前已有学者对不同类型灌区灌溉水利用率的变化特征展开了研究^[9-12],其中分形理论作为研究事物变化规律复杂性的重要方法之一^[13-16],已逐步被应用到灌溉水利用率的研究中:俞双恩等^[17]利用分形理论研究了河网灌区的分形特征,基于灌溉水利用系数与灌区面积、盒维数的相关性,建立了河网灌区灌溉水利用系数尺度转换模型;王小军等^[18]利用分形理论中的盒维数法计算了广东省 75 个样点灌区的盒维数,并建立了不同网格尺度下的灌区面积与灌溉水有效利用系数和盒维数空间尺度变异函数;屈忠义等^[19]应用 Horton 定律计算出河套灌区及灌域的分形维数,并在此基础上对不同灌域的渠系水利用效率与分维值进行了分析。以往研究对象多为南方灌区,对于北方灌区灌溉水利用率尺度变化规律的研究较少,且研究对象多是某一年的灌溉水利用率,对于省级等较大区域连续多年灌溉水利用率变化特征的研究尚少。因此,本文以我国北方农业大省——黑龙江省为研究对象,将分形理论与位序-规模法相结合对黑龙江省样点灌区灌溉水利用率的年度分形特点进行研究,同时

利用主成分分析法对不同类型灌区的影响因素进行分析,旨在灌区规划、节水潜力分析等提供科学参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

选取 2009—2014 年黑龙江省典型样点灌区的灌溉水利用率测算值为研究对象。样点灌区按大、中型灌区(大于 667 hm²)、小型灌区(0~667 hm²)和纯井灌区分类选取,共选取灌区 115 个(大、小兴安岭农业分区由于气候等因素不适于粳稻生长,暂不予以研究),样点灌区分布见图 1。灌溉水利用率数据源自 2009—2014 年黑龙江省灌溉水利用率测算分析结果,影响因素中渠系衬砌率、灌区工程完好率、灌区工程配套率、渠系复杂度、节水灌溉面积比率、田间渗漏量、水田面积比率、蒸发蒸腾比的数据来自黑龙江省灌溉信息网(<http://www.hljgxx.gov.cn>)。各影响因素含意^[6-8,18,20]见表 1。

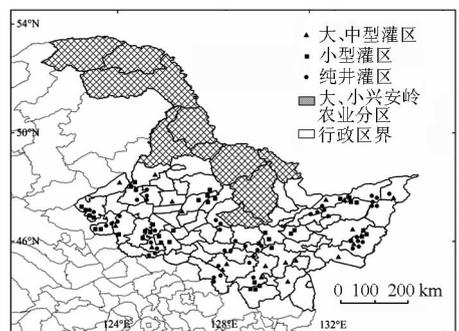


图 1 黑龙江省样点灌区分布图

Fig. 1 Distribution map of irrigation area samples in Heilongjiang province

1.2 研究方法

1.2.1 位序-规模法

分形是研究事物复杂性客观变化规律的重要理论,位序-规模法作为研究分形规律的一种方法,由德国学者 AUERBACH 于 1913 年首先提出,近些年来,该方法与分形理论相结合,已被广泛应用于城市结构、城市体系及交通网络等领域^[21-24]。灌溉水利用率受多种可变因素的影响,且各因素对不同类型灌区灌溉水利用率的影响程度不同,使得不同类型灌区灌溉水利用率的层次分布在数理统计角度上呈分维分形的复杂性特征^[17-18],因此,位序-规模法可

表 1 灌溉水利用率各影响因素含意

Tab. 1 Meaning of influence factors for irrigation

water use efficiency

影响因素	含意
渠系衬砌率	衬砌渠道占总输水渠道的比例
灌区工程完好率	能够正常运行的灌溉工程设施占有灌溉工程设施的比率
灌区工程配套率	灌区现有工程设施占设计灌区配套工程设施的比率
渠系结构复杂度	NL/L_m
节水灌溉面积比率	采取节水技术的灌溉面积占总灌溉面积的比率
田间渗漏量/ m^3	灌溉期间田间渗漏总水量
水田面积比率	水田灌溉面积占总灌溉面积的比率
蒸发蒸腾比	棵间蒸发量与作物蒸腾量之比

注： N 为渠道等级数， L 为渠道总长度， L_m 为主干渠总长度。

被用来研究灌溉水利用率的分形特征^[25]。位序-规模法计算公式为

$$P_i = P_1 R_i^{-q} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 n ——样点灌区数量

R_i ——样点灌区 i 的位序

P_i ——将所有样点灌区的灌溉水利用率按从高到低排序，位序为 i 的样点灌区的灌溉水利用率

P_1 ——常数，表示首位序灌区的灌溉水利用率

q ——Zipf 系数

Zipf 系数具有分形性质，与分维值 D 互为倒数^[26]， D 可以反映灌溉水利用率分布的均衡趋势。为了直观起见，通常对式(1)进行自然对数变换得

$$\ln P_i = \ln P_1 - q \ln R_i \quad (2)$$

对式(2)进行线性拟合，拟合直线斜率的绝对值即为 Zipf 系数，当 $q > 1$ 时， q 越大，表明高、低位序灌区的灌溉水利用率差距越大； $q = 1$ 表示灌溉水利用系数不同区间分布较为均衡（线性分布，即首位序与末位序的灌溉水利用率之比恰为样点灌区总数）；当 $q < 1$ 时， q 越小，高、低位序灌区的灌溉水利用率差距越小^[25]。

1.2.2 主成分分析

利用主成分分析法对灌溉水利用率的影响因素进行分析。主成分分析 (PCA) 作为回归分析的一

种，是将多个影响因素转换为少数相互无关的综合指标的统计方法，该方法可以很好地处理变量间的多重相关性^[27-29]。主成分分析的数学模型为

$$\begin{cases} F_1 = a_{11}x_1 + a_{21}x_2 + \dots + a_{p1}x_p \\ F_2 = a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{p2}x_p \\ \vdots \\ F_j = a_{1j}x_1 + a_{2j}x_2 + \dots + a_{pj}x_p \\ \vdots \\ F_k = a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{pk}x_p \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

式中 F_j ——各影响因素的成分

x_i ——灌溉水利用率的影响因素

a_{ij} ——因子载荷系数

通过计算各主成分的方差贡献率，选出累计方差贡献率大于 85% 的 m ($m < p$) 个主成分，根据 m 个主成分表达式中的 a_{ij} 计算各影响因素的权重，即

$$W_i = \left| \sum_{j=1}^m a_{ij} \omega_j \right| \quad (4)$$

式中 ω_j ——第 m 个主成分的方差贡献率

W_i ——各影响因素的权重，将其归一化后得到的权重向量即为各影响因素的权重向量 W

2 结果分析

2.1 灌溉水利用率年度变异分析

根据位序-规模法建立非线性回归模型(表 2)。由表 2 可知，各年位序-规模表达式的拟合度 R^2 均在 0.9 以上，表明该方法能较好地描述样点灌区灌溉水利用率规模分布特征；各年份 q 均小于 1，且呈现逐年增大的趋势，表明高位序与低位序灌区灌溉水利用率的差距在减小；分维值 D 在 5.26 ~ 6.25 区间内，整体上呈现减小趋势，进一步说明灌溉水利用率分布的均衡性逐年增强；灌溉水利用率的理论首位值与实际首位值的比值在 1.093 ~ 1.196 范围内，表明样点灌区的首位灌溉水利用率实际发展水平较理想值仍有差距，具有较大发展空间，这为黑龙江省灌溉水利用率的发展提出了更高的要求。

表 2 2009—2014 年黑龙江省灌溉水利用率规模分布

Tab. 2 Rank distribution for irrigation water use efficiency in Heilongjiang Province

年份	表达式	R^2	Zipf 系数	D	理论首位值 $\eta/\%$	实际首位值 $\eta'/\%$	η/η'
2009	$y = 81.766x^{-0.160}$	0.962	0.160	6.25	81.766	70.541	1.159
2010	$y = 85.266x^{-0.168}$	0.965	0.168	5.95	85.266	71.314	1.196
2011	$y = 87.091x^{-0.170}$	0.948	0.170	5.88	87.091	73.055	1.192
2012	$y = 91.937x^{-0.182}$	0.977	0.182	5.49	91.937	81.568	1.127
2013	$y = 94.293x^{-0.183}$	0.931	0.183	5.46	94.293	79.324	1.188
2014	$y = 99.332x^{-0.191}$	0.979	0.190	5.26	99.332	90.836	1.093

将2009—2014年样点灌区的实际灌溉水利用率分别按照从高到低进行排序,绘制样点灌区的规模位序和对应灌溉水利用率的散点图(图2),通过图2可以直观地看出各年度灌溉水利用率的变化特征。从整体上看,黑龙江省灌溉水利用率呈逐年上升的趋势,但局部变化又有所不同,例如:2011年灌溉水利用率在42%~43%区间内较为突出,低于其他5年;在2013年灌溉水利用率在45%~55%区间高于其他5年,由于各影响因素对不同类型灌区的影响程度不同,造成了灌溉水利用率分布的局部变化,通过以往的研究可知,自然因素对灌溉水利用率的影响并不突出,而灌区管理与工程条件等人为因素是造成灌溉水利用率差异性的主要原因^[6]。因此,有必要针对不同类型灌区采取不同措施以提升灌溉水利用率。

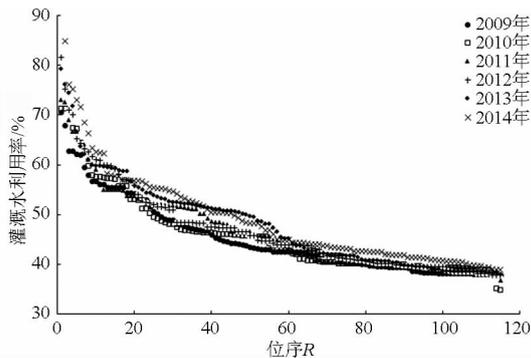


图2 2009—2014年黑龙江省灌溉水利用率位序-规模图
Fig. 2 Rank and size distribution graph for 2009—2014 irrigation water use efficiency of Heilongjiang Province

2.2 各年度分维特征

分别绘制黑龙江省样点灌区2009—2014年灌溉水利用率的位数-规模双对数散点图(图3),并对

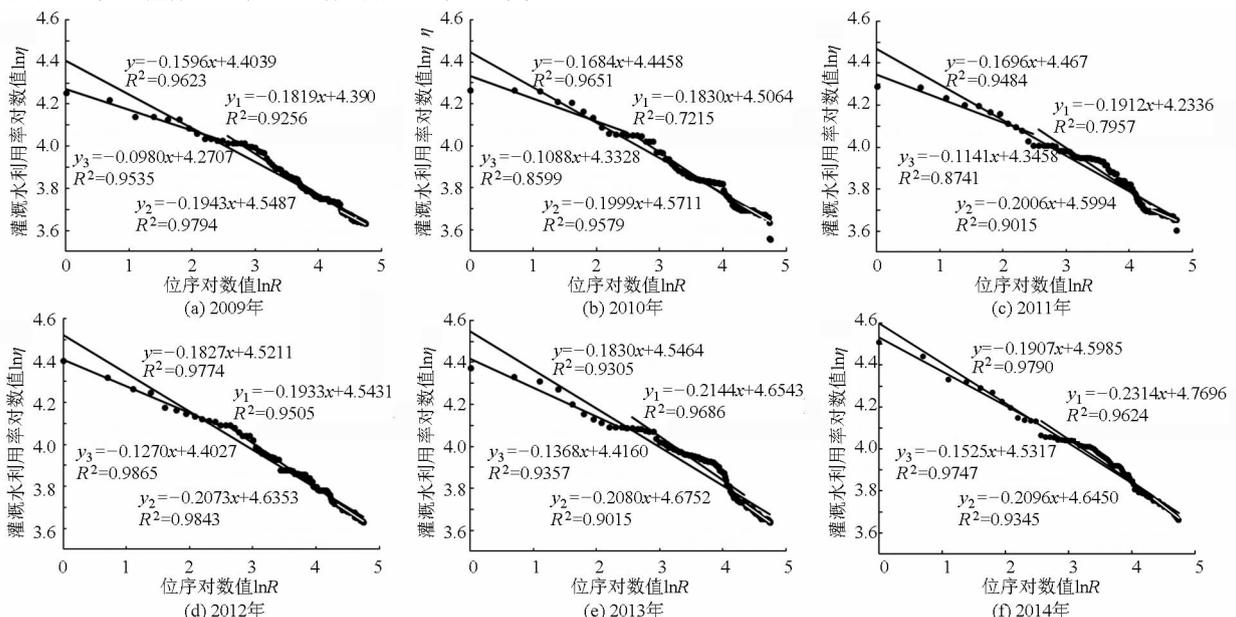


图3 2009—2014年黑龙江省样点灌区灌溉水利用率位序-规模双对数变化图

Fig. 3 Variation graph of double logarithms of 2009—2014 irrigation water use efficiency rank and size in Heilongjiang Province

不同类型样点灌区进行线性拟合。其拟合直线的斜率与 Zipf 系数近似相等,其中 y 为全省样点灌区拟合直线, y_1 为大、中型样点灌区拟合直线, y_2 为小型样点灌区拟合直线, y_3 为纯井样点灌区拟合直线。通过对比6年不同类型样点灌区的拟合结果可以看出,全省样点灌区的灌溉水利用率分布均呈现多分形结构;直线 y 、 y_1 、 y_2 、 y_3 的斜率均逐年增大,这表明,各类型灌区灌溉水利用率分布的均衡性均在逐年增强;其中,直线 y_3 的斜率绝对值变化范围最大(0.098 0~0.152 5), y_2 的斜率绝对值变化范围最小(0.194 3~0.209 6),表明纯井灌区灌溉水利用率的均衡性提升最为明显,小型灌区灌溉水利用率分布的均衡性提升最不明显;直线 y_3 、 y_2 与 y 的斜率夹角呈现明显的减小趋势,而直线 y_1 与 y 的变化规律并不明显,但整体上看,黑龙江省灌溉水利用率的分布正从多分形结构逐步向单分形结构发展,表明黑龙江省的灌溉水利用率逐步呈现出均衡增长的趋势。

2.3 分维机制分析

在定性对比的基础之上,进一步定量分析灌溉水利用率与分维值 D 的关系。将2009—2014年不同类型灌区灌溉水利用率分布的分维值与灌溉水利用率分别作为横纵坐标,绘制散点图(图4)。从图4可以看出,不同类型灌区均呈现良好的二次函数关系,通过计算其顶点坐标可以得出不同类型灌区灌溉水利用率分布的分维值 D 与灌溉水利用率 η 的最优点(即灌溉水利用率最大,分布均衡性最强):大、中型灌区分维值 $D_1 = 4.58$ 时,灌溉水利用率 η_1 最大为44.44%,小型灌区分维值 $D_2 = 4.79$ 时,灌溉水利用率的 η_2 可达最大值53.81%;纯井灌

区的分维值 $D_3 = 6.98$ 时,灌溉水利用率 η_3 可达最大值 70.41%;全省灌区分维值 $D = 5.13$ 时,灌溉水利用率 η 可达最大值 57.03%。通过分析分维值与灌溉水利用率的关系,可为减小不同类型灌区灌溉水利用率离散度、均衡提升灌溉水利用率提供理论依据。

$$y = -2.443x^2 + 25.095x - 7.405 \quad y_2 = -25.731x^2 + 246.450x - 536.310$$

$$R^2 = 0.936 \quad R^2 = 0.920$$

$$y_1 = -6.010x^2 + 55.110x - 81.889 \quad y_3 = -0.226x^2 + 3.154x + 59.402$$

$$R^2 = 0.820 \quad R^2 = 0.980$$

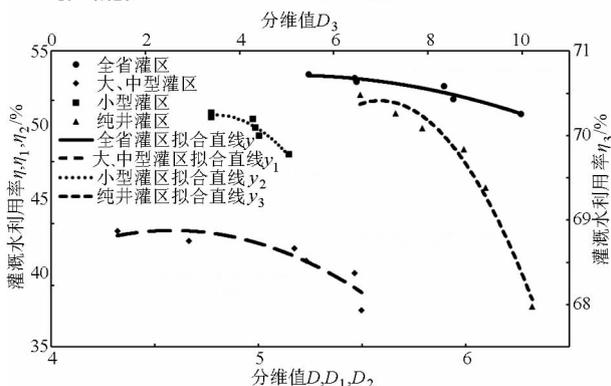


图 4 2009—2014 年黑龙江省不同类型样点灌区灌溉水利用率-分维值散点图

Fig. 4 Scatter diagram for irrigation water use efficiency and fractal dimension value of different scale irrigation area samples in 2009—2014

2.4 影响因素分析

为有针对性地提升不同类型灌区的灌溉水利用率,使全省灌溉水利用率实现稳步均衡增长,对不同

类型灌区灌溉水利用率的影响因素进行分析。由于各变量之间可能存在线性关系,因此,采用主成分分析法对影响黑龙江省不同类型灌区灌溉水利用率的因素进行分析。影响因素包括:渠系衬砌率 x_1 、灌区工程完好率 x_2 、灌区工程配套率 x_3 、渠系结构复杂度 x_4 、节水灌溉面积比率 x_5 、田间渗漏量 x_6 、水田面积比率 x_7 、蒸发蒸腾比 x_8 。

通过 SPSS 软件,得出各主成分的特征值及方差贡献率(表 3),可以看出 3 种类型样点灌区的第 1、2 主成分的累计方差贡献率均在 85% 以上,表明前 2 个成分已包含了各影响因素中的大部分信息,因此,3 种类型样点灌区均选用主成分 1、2 即可。表 4 为不同类型样点灌区各主成分的因子载荷系数。

表 3 各主成分方差贡献率

Tab. 3 Variance contribution rate of principal component analysis

主成分	大、中型灌区		小型灌区		纯井灌区	
	方差贡献率	累计方差贡献率	方差贡献率	累计方差贡献率	方差贡献率	累计方差贡献率
1	68.007	68.007	66.847	66.847	66.830	66.830
2	17.527	85.534	20.556	87.403	21.524	88.354
3	11.491	97.025	6.491	93.894	10.391	98.745
4	1.609	98.634	4.329	98.223	0.609	99.354
5	0.854	99.488	1.286	99.509	0.398	99.752
6	0.329	99.817	0.237	99.746	0.128	99.880
7	0.092	99.909	0.156	99.902	0.072	99.952
8	0.091	100	0.098	100	0.048	100

表 4 主成分因子载荷系数

Tab. 4 Factor loading coefficient of principal component analysis

灌区类型	主成分	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
大、中型灌区	1	0.688	0.493	-0.263	0.231	-0.168	0.084	-0.158	-0.026
	2	-0.823	-0.358	-0.777	0.472	-0.302	-0.147	0.930	0.181
小型灌区	1	-0.223	-0.538	0.435	0.001	0.204	0.405	0.221	0.015
	2	-0.821	0.492	-0.113	0.867	0.127	-0.036	-0.406	0.032
纯井灌区	1	0.259	0.046	0.066	0.510	0.698	0.108	0.167	-0.003
	2	-0.119	-0.120	0.699	-0.720	-0.924	0.924	0.059	0.401

根据式(4)计算出不同类型灌区各影响因素的权重,结果见图 5。可以看渠系衬砌率和灌区工程配套率对大、中型灌区的影响程度远高于其他 6 项因素,这表明对于大、中型灌区而言,应减少输水过程中的渗漏损失,且黑龙江省的大、中型灌区大多建设年代较远,灌溉工程设备更新缓慢,应当加强大、中型灌区工程基础设施的配套建设;对于小型灌区而言,影响程度最大的因素为渠系衬砌率,其次为灌区工程配套率、灌区工程完好率与田间渗漏量,蒸发蒸腾比的影响程度最小,且远低于其他指标,表明对于小型灌区仍应加强基础工程的建设与养护工作;

灌溉工程配套率、节水灌溉面积比率和田间渗漏量这 3 个因素对纯井灌区的影响远高于其他影响因素,其中,田间渗漏量对纯井灌区的灌溉水利用率影响程度最大,因此,对于纯井灌区而言,提高灌溉水利用率的关键在于减少田间渗漏^[20,30]。

3 结论

(1)黑龙江省样点灌区灌溉水利用率分布符合位序规模-分布法则,2009—2014 年灌溉水利用率的理论首位值与实际首位值的比值范围在 1.093 ~ 1.196 区间内,表明样点灌区的理论灌溉水利用率

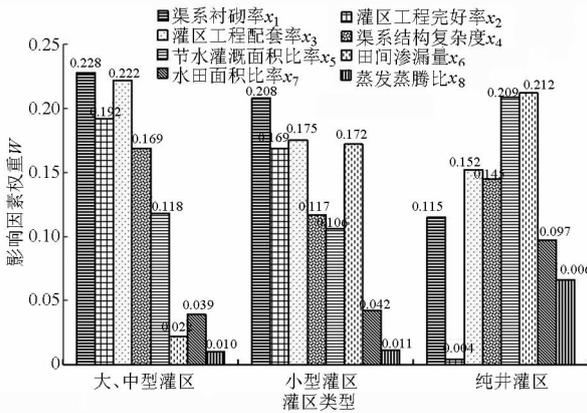


图5 不同类型灌区各影响因素权重分布图

Fig.5 Influence factors weights of different scales irrigation area

较实际水平仍然存在较大差距;2009—2014年样点灌区灌溉水利用率的分维值范围在5.26~6.25区间内,且呈现逐年减小的趋势,表明黑龙江省灌溉水利用率分布的均衡性逐年增强。

(2)大、中型灌区、小型灌区和纯井灌区的灌溉水利用率分布的均衡性均逐年增强,其中,纯井灌区灌溉水利用率分布的均衡性提升最为明显,而小型灌区均衡性提升范围最小;整体上看,黑龙江省灌溉水利用率的分布逐步从多分形结构向单分形结构转变。

(3)大、中型灌区分维值 $D_1 = 4.58$ 时,灌溉水利用率达最大值44.44%,小型灌区分维值 $D_2 = 4.79$ 时,灌溉水利用率可达最大值53.81%;纯井灌区的分维值 $D_3 = 6.98$ 时,灌溉水利用率可达最大值70.41%;全省灌区 $D = 5.13$ 时,灌溉水利用率可达最大值57.03%。

(4)大、中型灌区灌溉水利用率的主要影响因素为渠系衬砌率和灌区工程配套率;小型灌区影响程度最大的因素为渠系衬砌率,蒸发蒸腾比的影响程度最小;纯井灌区的主要影响因素为田间渗漏量。

参 考 文 献

- SAMUEL M P, MATHEW A C. Improving water use efficiency by integrating fish culture and irrigation in coconut based farming system: a case study in Kasaragod district of Kerala (India) [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2014, 7(2): 36-44.
- 崔远来,熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 590-598.
CUI Yuanlai, XIONG Jia. Advances in assessment indicators of irrigation water use efficiency [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 590-598. (in Chinese)
- 陈皓锐,伍靖伟,黄介生,等. 关于灌溉用水效率尺度问题的探讨[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 1-6.
CHEN Haorui, WU Jingwei, HUANG Jiasheng, et al. Discussion about several scale issues of irrigation water use efficiency [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 1-6. (in Chinese)
- 崔远来,董斌,李远华,等. 农业灌溉节水评价指标与尺度问题[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 1-7.
CUI Yuanlai, DONG Bin, LI Yuanhua, et al. Assessment indicators and scales of water saving in agricultural irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 1-7. (in Chinese)
- 陈皓锐,黄介生,伍靖伟,等. 灌溉用水效率尺度效应研究评述[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 872-880.
CHEN Haorui, HUANG Jiasheng, WU Jingwei, et al. Review of scale effect on the irrigation water use efficiency [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 872-880. (in Chinese)
- 付强,刘巍,刘东,等. 黑龙江省灌溉用水效率指标体系空间格局研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 127-132.
FU Qiang, LIU Wei, LIU Dong, et al. Spatial distribution of irrigation water use efficiency index system in Heilongjiang province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 127-132. (in Chinese)
- 王小军,张强. 广东省灌溉水有效利用系数影响因素的动静态分析[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 6-11.
WANG Xiaojun, ZHANG Qiang. Static and dynamic analysis of factors affecting the efficient utilization coefficient of irrigation water in Guangdong province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 6-11. (in Chinese)
- 谭芳,崔远来,王建漳. 灌溉水利用率影响因素的主成分分析——以漳河灌区为例[J]. 中国农村水利水电, 2009(2): 70-73.
TAN Fang, CUI Yuanlai, WANG Jianzhang. Impact factors of irrigation water use efficiency based on principal component analysis, case from Zhanghe irrigation district [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(2): 70-73. (in Chinese)
- 谢先红,崔远来. 灌溉水利用效率随尺度变化规律分布式模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 681-689.
XIE Xianhong, CUI Yuanlai. Distributed hydrological modeling of irrigation water use efficiency at different spatial scales [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 681-689. (in Chinese)
- 代俊峰,崔远来. 基于SWAT的灌区分布式水文模型——II. 模型应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 311-318.
DAI Junfeng, CUI Yuanlai. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT II. model application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 311-318. (in Chinese)
- 操信春,吴普特,王玉宝,等. 不同灌溉水分生产率指标的时空变异与相关关系[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 189-194.
CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Spatial and temporal variation of three irrigation water productivity indexes in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 189-194. (in Chinese)

- 12 SINGH R, VAN DAM J C, FEDDES R A. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 82(3): 253 - 278.
- 13 秦耀辰,刘凯. 分形理论在地理学中的应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 426 - 436.
QIN Yaochen, LIU Kai. Advancement of applied studies of fractal theory in geography[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 426 - 436. (in Chinese)
- 14 张少文,王文圣,丁晶,等. 分形理论在水文水资源中的应用[J]. *水科学进展*, 2005, 16(1): 141 - 146.
ZHANG Shaowen, WANG Wensheng, DING Jing, et al. Application of fractal theory to hydrology and water resources[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(1): 141 - 146. (in Chinese)
- 15 WHARTON G, TOMLINSON J J. Flood discharge estimation from river channel dimensions: results of applications in Java, Burundi, Ghana and Tanzania[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1999, 44(1): 97 - 111.
- 16 刘德平. 分形理论在水文过程形态特征分析中的应用[J]. *水利学报*, 1998, 29(2): 21 - 26.
LIU Deping. The application of fractal theory in hydrologic process shape characteristic analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 29(2): 21 - 26. (in Chinese)
- 17 俞双恩,于智恒,郭杰,等. 河网区灌溉水利用系数的尺度转换[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 147 - 151.
YU Shuang'en, YU Zhiheng, GUO Jie, et al. Scale transformation of utilization coefficient of irrigation water in riverine irrigation district[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(8): 147 - 151. (in Chinese)
- 18 王小军,张强,古璇清. 基于分形理论的灌溉水有效利用系数空间尺度变异[J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1201 - 1212.
WANG Xiaojun, ZHANG Qiang, GU Xuanqing. Fractal-based effective utilization coefficient of irrigation water space scale variability[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1201 - 1212. (in Chinese)
- 19 屈忠义,杨晓,黄永江,等. 基于Horton分形的河套灌区渠系水利用效率分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 120 - 127.
QU Zhongyi, YANG Xiao, HUANG Yongjiang, et al. Analysis of efficiency of water utilization in canal-system in Hetao irrigation district based on Horton fractal[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(13): 120 - 127. (in Chinese)
- 20 闫昕. 黑河中灌区不同尺度灌溉水有效利用系数估算[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2015.
- 21 DAS R J, DUTT A K. Rank-size distribution and primate city characteristics in India—a temporal analysis[J]. *GeoJournal*, 1993, 29(2): 125 - 137.
- 22 程开明,庄燕杰. 城市体系位序-规模特征的空间计量分析——以中部地区地级以上城市为例[J]. *地理科学*, 2012, 32(8): 905 - 912.
CHENG Kaiming, ZHUANG Yanjie. Spatial econometric analysis of the rank-size rule for urban system: a case of prefectural-level cities in China's middle area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 905 - 912.
- 23 杨国良,张捷,刘波,等. 旅游流流量位序-规模分布变化及其机理——以四川省为例[J]. *地理研究*, 2007, 26(4): 662 - 672.
YANG Guoliang, ZHANG Jie, LIU Bo, et al. Study on tourists flow rank-size distribution variation and the mechanism: taking Sichuan province as an example[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(4): 662 - 672. (in Chinese)
- 24 赵媛,牛海玲,杨足膺. 我国石油资源流流量位序-规模分布特征变化[J]. *地理研究*, 2010, 29(12): 2121 - 2131.
ZHAO Yuan, NIU Hailing, YANG Zuying. Study on the rank-size distribution and variation of crude oil flow in China[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(12): 2121 - 2131. (in Chinese)
- 25 王小军,张强,易小兵. 广东省灌溉水有效利用系数年度变化与影响因素关系分析[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(1): 64 - 68.
WANG Xiaojun, ZHANG Qiang, YI Xiaobing. Annual variation of irrigation water effective utilization coefficient and analysis of influencing factors in Guangdong province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(1): 64 - 68. (in Chinese)
- 26 FRAGKIAS M, SETO K C. Evolving rank-size distributions of intra-metropolitan urban clusters in South China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2009, 33(3): 189 - 199.
- 27 李浩鑫,邵东国,尹希,等. 基于主成分分析和Copula函数的灌溉用水效率评价方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 96 - 102.
LI Haoxin, SHAO Dongguo, YIN Xi, et al. Evaluation method for irrigation-water use efficiency based on principle component analysis and Copula function[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(11): 96 - 102. (in Chinese)
- 28 李世华,牛铮,路鹏,等. 基于主成分分析红壤有效含水量估算模型[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(5): 92 - 94.
LI Shihua, NIU Zheng, LU Peng, et al. Red soil available water capacity statistical model based on principal component analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5): 92 - 94. (in Chinese)
- 29 JOLIFFE I T, MORGAN B J. Principal component analysis and exploratory factor analysis[J]. *Statistical Methods in Medical Research*, 1992, 1(1): 69 - 95.
- 30 冯保清. 我国不同尺度灌溉用水效率评价与管理研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.