

# 灌区渠系特征与灌溉水利用系数的Horton分维

王小军<sup>1</sup>, 张强<sup>2</sup>, 易小兵<sup>1</sup>, 肖名忠<sup>2</sup>

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510635; 2. 中山大学水资源与环境系, 广州 510275)

摘要: 灌区渠系和自然河流水系存在着诸多相似之处, 因此, 对于灌区渠系体系是否存在及在何种程度下满足Horton 河系定律值得研究。以2010年广东省53宗样点灌区为研究对象, 分类进行了适用性分析, 发现只有四级渠系类灌区满足Horton 河系定律。在此基础上计算了各级渠系类灌区的渠系特征参数和分维值, 并利用2007-2011年实测数据, 对其与灌溉水有效利用系数之间的作用关系进行了定性和定量分析, 结果表明: 渠系工程状况参数(0.1084) > 下垫面参数(-0.3554) > 渠系结构参数(-0.5189) > 面积尺度参数(-0.5392) > 渠系分维特征参数(-0.5536)。本研究对于定量表征灌区形态和渠系特征对灌溉水有效利用系数的影响提供了新的途径, 研究结果对于指导灌区渠系规划建设, 提高用水效率具有积极现实意义。

关键词: Horton 定律; 渠系; 灌溉水有效利用系数

DOI: 10.11821/dlyj201404017

## 1 引言

对河网结构的分析是研究河流水系形态和功能的一个重要理论基础, 自从20世纪50年代Horton 等提出Horton 定律以来, 学者对河系形态研究达到了一个新的层次<sup>[1-3]</sup>, 从目前的相关研究来看, 对河流水系结构的研究主要集中在自然状态的河网和流域<sup>[4,5]</sup>。而灌区渠系和人工建造的道路、运河、管道等网络系统一样, 是在遵循自然规律的基础上, 充分发挥人的主观能动性, 因势利导建造而成的, 它同自然界自组织形成的分形系统(如水系等)具有很多相似之处, 是遵从自然规律和分形体系特征的客观反映。但对于经过人工改造的灌区渠系结构的Horton 表现及其表征方法<sup>[6]</sup>, 国内目前还鲜见相关研究。

鉴于Horton 河系定律及分形学理论能否被引入灌区渠系研究, 以及形态与功能之间的关联如何表征等问题, 本文拟通过对灌区的渠系分维数进行计算, 并与水系分维进行分析对比, 以便对灌区渠系这一人工水系与天然水系的相似性、差异性以及水系定律适用性进行分析。在此基础上, 以灌区渠系特征和分维量度为基础, 对其特征进行量化分析, 结合渠系相关属性参数指标, 系统研究各属性因素对灌溉水有效利用系数的影响作用, 从一个全新的角度解构灌区渠系分布形态特征与服务功能(灌溉水有效利用系数)之间的关系和

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-12-12

基金项目: 广东省水利科技创新项目(201107); 水利部公益性行业科研专项项目(200901074); 国家自然科学基金项目(41071020)

作者简介: 王小军(1979-), 男, 甘肃宁县人, 博士, 高级工程师, 主要从事农业水资源和水土保持研究。

E-mail: wxj1999\_2003@163.com

通讯作者: 张强(1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域气象水文学研究、旱涝灾害机理、流域地表水文过程等研究。E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

作用机理, 研究结论可为灌区改造的渠系合理化布局和提高灌溉用水的效率提供参考。

## 2 研究区概况与数据来源

广东省(20°09'~25°31'N、109°45'~117°20'E)陆域土地总面积17.97万km<sup>2</sup>, 根据《2010年广东省水资源公报》公布的数据, 全省水资源总量1998.79亿m<sup>3</sup>, 有效灌溉面积18725.50 km<sup>2</sup>, 实灌面积16976.30 km<sup>2</sup>, 农业灌溉取水总量225.52亿m<sup>3</sup>, 有大、中型灌区325宗, 小型灌区20335宗。分析所采用的灌区数据来源于《全国灌溉用水有效利用系数测算分析——广东省“十一五”农业灌溉用水有效利用系数测算分析》课题, 样点灌区按照大、中、小型灌区和纯井灌区四种不同规模与类型, 并综合考虑工程设施状况、管理水平、灌溉水源条件、作物种类和种植结构、地貌等因素的代表性进行分类选取。各年度广东省选择并连续开展用水计量实测的各类型样点灌区共107宗, 其中有大、中、小型灌区75宗, 样点灌区除小型灌区外, 从个数和有效灌溉面积都满足占全省比重10%的要求, 可以代表全省平均状况。各灌区及年度灌溉用水有效利用系数通过“首尾测算法”<sup>[7]</sup>得到。

## 3 研究方法

### 3.1 河流水系与灌区渠系的共性和差异

#### (1) 渠系与水系的相似性

首先, 以基本属性而言, 自然界中的河流水系(河道)和灌区的输水渠道都是存在于各种自然力所营造的陆地中的水体, 都是在重力作用下流动水体的一种传递、输送流量和能量的承载运行方式。其次, 水系和渠系的运动介质都源于自然水循环过程的连续性和流动性, 这种特性是水体运动中自然界物质与能量守恒定律的具体表现, 在形式上共同决定了输送水体的物质载体<sup>[8]</sup>。再次, 水系和渠系在结构形式相似。水系结构形式多样, 常见的有树枝状水系、扇形水系、羽状水系、平行状水系和网状水系等。而灌区根据其地形依势而建的各类渠道, 也与河流水系特征有着很大的相似性, 同样存在着干、支流关系, 水系的各结构形式在灌区渠系分布上都能找到。最后, 流速流态相同, 河流水体从高处向低处流动, 水系在流动的过程中上、下游之间由于地形和河形因素的影响是一种非均匀流, 如果流速过小就会产生淤积和雍水, 流速过大, 河形相应就会发生变化, 其自然调整过程主要表现为冲刷堤岸, 失去稳定性。在渠系设计和建造中也规定了一个最大和最小允许流速范围, 以防止淤积和冲刷。

#### (2) 渠系与水系的差异性

首先, 河流水系是在自然地貌中经过上亿年自发形成的一种自适应性输水形态, 以自然规律运行为主, 受人为影响较小。而灌区渠系以人为改造为主, 其形态和运行方式受人为改造作用较大, 在形态上表现的更为规则和直线化。其次, 水系的水量来源更新以天然水源为主, 受自然降雨、植被、地貌等因素控制, 而渠系水量来源以水库和河流引水为主, 受人为调控影响较多。再次, 流向终端不同, 在流动过程中河流是自源头经支流汇入干流, 再汇入主流, 呈现从小到大的枝状结构, 总体而言是一种水量的加法。而渠系以干渠→支渠→斗渠→农渠方式分散输送, 也呈枝状结构, 但是一种水量的减法, 流向和功能截然相反。最后, 渠系的输水断面一般比较规则, 有较为确定和规则的矩形、梯形或U

形断面,而水系河岸和堤防虽然部分也经过人为整形,但绝大部分还是以天然形态河床为主,呈自然的不规则形态<sup>[9]</sup>。上述这些不同决定了渠系和水系虽然同为水的承载媒介,但其运行方式和形态构成上有很大的区别,这种区别更明显地在其形态特征上有所体现,进而在功能上也有不同。因此,本文尝试借用水系定律来分析和揭示灌区渠系形态、分布规律及其作用机制。

### 3.2 渠系级别的划分

由于在人工影响下的灌区各级渠系发育所表现出来的自相似性已受到影响,与河流水系有很大的不同<sup>[10]</sup>,同时,因为每宗灌区的规模不同,水源状况不一,又由于灌区渠道兼有其他用途用水或排洪的功能,即使在同样规模下同一级渠道的流量差异也很大,按流量进行渠道分级不符合实际情况。因此本文直接按照从水源引水的次序对渠系进行分级,即:直接从水源处引水的渠道为一级渠系,从一级渠道分枝引水的渠道为二级渠系;从二级渠道分枝引水的渠道为三级渠系,依次类推,自水源处从上往下分级,不受最后一级渠系和灌区河道大小以及灌区类型和规模的限制,具有简便、通用的优势。各级渠系相对应于传统意义上的干渠、支渠、斗渠和农渠等各级(本文分析中只对输配水渠系进行分析,对属于田间用水的毛渠不在统计范围)。在此基础上采用渠频数、渠网密度、渠网复杂度等指标来对渠系结构的变化进行描述。

### 3.3 Horton 河系定律特征参数计算

河流水系的结构特征和数量关系所具有的自然和谐的等级和空间秩序可以用 Horton 定律来描述其。反映河流水系结构特性的量化指标的特征参数主要包括河网密度、河系发育系数、河系不均匀系数、河频数、分枝比、长度比、水面率、河网复杂度、河网发展系数及河网结构稳定度等指标<sup>[11]</sup>。

同样,借助河系的特征参数,对渠系结构选取以下特征参数进行量化表征。

(1) 渠频数 ( $R_f$ ): 单位灌区面积内各级渠系的数目。

$$R_f = N/S \quad (1)$$

$N$ 为灌区内渠道数目; $S$ 为灌区总面积,单位 $\text{km}^2$ 。

(2) 渠网密度 ( $R_d$ ): 单位灌区面积内渠道长度,反映了灌区渠系的长度-面积比。

$$R_d = L/S \quad (2)$$

$L$ 为灌区内渠道总长度,单位为 $\text{km}$ ; $S$ 为灌区总面积,单位 $\text{km}^2$ 。在相似的自然条件下,渠网密度越大,渠道输水流量也越大。

(3) 分枝比 ( $R_b$ ): 相邻渠道数目的比值,反映灌区相邻渠系节点数量。

$$R_b = N_{m-1}/N_m \quad (3)$$

$N_{m-1}$ 为灌区下一级渠道总数目,单位为个; $N_m$ 为灌区本级渠道总数目,单位为个。

(4) 长度比 ( $R_l$ ): 相邻渠道长度的比值,反映灌区相邻渠系长度。

$$R_l = L_{m-1}/L_m \quad (4)$$

$L_{m-1}$ 为灌区下一级渠道长度,单位为 $\text{km}$ ; $L_m$ 为灌区本级渠道长度,单位为 $\text{km}$ 。

(5) 渠网结构复杂度 ( $R_c$ ): 反映灌区渠系构成层次的丰富度,渠网数量和长度的发育程度越高说明渠网构成层次越丰富,渠系越发达。

$$R_c = N_0 \times L/L_g \quad (5)$$

$N_0$ 为灌区渠等级数; $L$ 为灌区内渠道总长度,单位为 $\text{km}$ ; $L_g$ 为灌区主干渠总长,单位为 $\text{km}$ 。

(6) 渠网发展系数 ( $R_z$ ): 各级灌区渠道总长度与干渠长度之比,反映灌区渠系第 $j$ 级渠道的长度发展程度。

$$R_z = L_j / L_g \quad (6)$$

$L_j$ 为灌区第 $j$ 级渠道的长度, 单位km;  $L_g$ 为灌区主干渠总长, 单位为km。

灌区的渠系发展系数越大, 说明支渠及以下渠系长度超过干渠长度越多, 对灌溉水量的输配水和调节作用越有利。

### 3.4 河流水系结构分维数计算

自分形几何学产生以后, 有学者便致力于寻求 Horton 水系定律和分形理论之间的内在联系<sup>[12]</sup>, 20世纪80年代末期, 经过 Barbera 和 Rosso 等的深入研究, 其 Horton-Strahler 定律以及 Hack 定律所隐含的分形性质比较明确地展示出来<sup>[13]</sup>。主要由河流水系的分枝比 ( $R_b$ ) 和长度比 ( $R_l$ ) 来计算分维 ( $D$ )<sup>[14]</sup>。Horton 研究认为, 同一流域内河流的数目 ( $N$ )、长度 ( $L$ ) 等水系结构参数随河道级别不同而呈现几何级数的变化<sup>[15,16]</sup>, 即:

$$N_\omega = R_b^{Q-\omega} \quad (7)$$

$$L_\omega = L_1 R_l^{\omega-1}$$

$R_b$ 为河流水系分枝比;  $R_l$ 为河流水系长度比;  $\omega$ 为河流级别序号;  $Q$ 为河流最高级别;  $N_\omega$ 为第 $\omega$ 级河流的数目;  $L_1$ 、 $L_\omega$ : 分别为第1、 $\omega$ 级河流的平均长度, 单位为km。

在 $\omega$ 和 $\omega - \lg L_\omega$ 坐标上, 以 $\omega$ 为横坐标计算得到的直线斜率绝对值的反对数分别来表示 $R_b$ 和 $R_l$ 的值, 即:

$$R_x = 10^{|k_x|} \quad (8)$$

$R_x$ 为水系结构参数 ( $x=b, l$ );  $k_x$ 为相应依次为 $\omega - \lg N_\omega$ 和 $\omega - \lg L_\omega$ 图上回归直线的斜率。

学者研究得出的规律:  $R_b$ 一般在3~5之间,  $R_l$ 一般在1.5~3之间。

对于统计意义上的 $R_b^{[17]}$ 可按式计算:

$$R_b = \frac{\sum_{\omega=1}^{Q-1} N_\omega + N_{\omega+1}) \times R_{b(\omega, \omega+1)}}{\sum_{\omega=1}^{Q-1} N_\omega + N_{\omega+1}} \quad (9)$$

$R_{b(\omega, \omega+1)}$ 为第 $\omega$ 级河流和第 $\omega+1$ 级河流间的分枝比。

Horton 认为流域内不同等级水系的发育具有自相似特征, 国内外学者就水系分维以及流域地貌特征开展了相关研究<sup>[18]</sup>, 建立了分维值与水系特征参数间的关系。La Barbera 和 Rosso 给出的水系分维 $D$ 计算式<sup>[19]</sup>为:

$$D = \lg R_b / \lg R_l \quad (10)$$

Barbera 等<sup>[20]</sup>认为水系分维应在1~2之间, 平均值为1.6~1.7, Tarboton 等<sup>[21]</sup>计算出的分维 $D$ 值在1.7~2.5之间<sup>[21]</sup>。水系分维越大说明水系越复杂, 反之则越简单。本文借助上述方法和公式来计算渠系的分维。

## 4 实例分析

### 4.1 灌区渠系结构特征识别分析及分维数

以广东省2010年度107处典型样点灌区年度资料为基础, 进行渠系结构分级统计, 为了统计数据的唯一性和分析的可靠性, 首先把面积只有几到十几公顷的井灌样点和同在中型样点灌区内的小型样点灌区剔除; 同时把面积较小或水源近宜等影响导致的非常规渠系(渠系结构单一, 只有一级输水渠系)样点灌区也去掉, 最后保留了53个大中小型样点灌区进行统计分析, 按渠系级数分类, 共分为两级渠系类灌区、三级渠系类灌区和四级渠系

类灌区三类(表1)。

表1 2010年样点灌区渠系特征及分维分级比较表

Tab. 1 Comparison of irrigation district canal system characteristics and the fractal dimension classification of sample irrigation area in 2010

渠系分级	灌区个数/宗	当年有效灌溉面积/km <sup>2</sup>	灌溉水有效利用系数	D值	R <sub>b</sub>	R <sub>l</sub>	渠道密度/km·km <sup>-2</sup>	渠频数/条·km <sup>2</sup>	渠系结构复杂度	渠系发展系数
两级	24	15.40	0.431	0.71	1.49	2.42	938.47	400.20	6.63	2.53
三级	13	114.10	0.432	0.51	1.26	2.68	1076.36	886.61	23.78	6.92
四级	15	61.30	0.422	1.71	3.91	2.34	1960.51	1208.70	52.08	12.01
全部	53	63.60	0.428	0.98	2.22	2.48	1325.11	831.83	27.50	7.16

各类参数平均值显示,反映灌区渠系特征的渠道密度、渠频数、渠系结构复杂度和渠系发展系数随渠系级数的增加呈现逐级递增的变化特征,即灌区渠系分级越多,渠系结构越复杂。24个两级渠系类灌区的平均有效灌溉面积15.40 km<sup>2</sup>,在三类灌区中最小,其相应的渠道密度、渠频数、渠系结构复杂度和渠系发展系数也最小,除渠道密度指标处,其他三项都还不及三级渠系类的一半,而渠系分枝比反而高于三级渠系类,但渠道长度比相差不多,说明该类灌区总体上以渠道分枝比较大。

三级渠系类灌区平均有效灌溉面积最大为114.11 km<sup>2</sup>(因为包含有2宗大型灌区),不含大型灌区为28.00 km<sup>2</sup>,将近两级渠系类灌区的8倍,四级渠系类灌区的2倍。说明该类灌区以大中型灌区构成为主。其分枝比为三类灌区中最低,长度比最高,说明该类灌区总体上以分枝较小的长距离渠道输水为主,符合中型灌区的主干渠道特征,其他指标都介于两级和四级渠系类之间。

四级渠系类灌区平均有效灌溉面积为63.60 km<sup>2</sup>(包含1宗大型灌区),不含大型灌区为61.00 km<sup>2</sup>,是两级渠系类灌区的4倍,说明该类灌区以中小型灌区构成为主。其分枝比为三类灌区中最高,远大于其他两类,长度比最小,说明该类灌区总体以分枝较大的中短距离渠道输水为主,符合面积偏小型灌区的主干渠道特征。而其他指标如渠道密度、渠频数、渠系结构复杂度和渠系发展系数都为三类灌区中最高,除渠频数外,其他三项指标基本都比两级和三级渠系类灌区成倍增加,说明该类灌区的渠系结构最复杂,渠系发展系数最高。

现有研究表明:河流水系的分枝比 $R_b$ 在3~5之间,长度比 $R_l$ 在1.5~3之间。通过比较三类灌区的分维值 $D$ ,发现只有四级渠系类样点灌区其分枝比 $R_b$ 为3.91, $R_l$ 为2.34, $D$ 值在1~2之间,正好在水系Horton定律一般范围之内。通过分析渠系分形发展的情况,即其分枝比与长度比的值,说明渠系分布的情况能够很好地吻合分形规律,符合自然界的自组织优化结构。也就是说在这种渠系发展情况下,灌区水量能在重力的作用下,能更有效地分配到灌区各处。而两级渠系类和三级渠系类灌区的 $D$ 值和 $R_b$ 值都小于Horton的河系定律的一般区间,说明这两类灌区渠系特征并不符合Horton河系定律。分析其原因主要在于灌区渠道修建过程中,通过高度人为工程化的渠网其自相似结构在局部地区遭到破坏,主要表现为灌区面积较小的两级渠系类渠系结构简单,第一级和第二级渠道数目和长度不同程度地减少,使得灌区渠系平均分枝比和长度比下降,这也是导致计算的渠系分维值出现异常的原因。

两级渠系和三级渠系类灌区维数 $D < 2$ ,维数 $D$ 值偏小,根据公式(10),提高 $D$ 值途径主要有:①提高灌区渠系分枝比 $R_b$ ,表现在灌区的渠系分布结构上分枝数应充分发

展，在可能范围内尽量增加渠系级数。②降低长度比 $R_L$ ，也就是降低同级渠系的长度，适当增加灌区渠系下一级渠系的长度，或者相对缩短上一级渠系的长度，变长渠为短渠。

### 4.2 渠系分维结构对灌溉水有效利用系数的影响

通过对不同渠系层级类样点灌区的渠系特征分析表明，除渠系发展较完备的四级渠系外，其他低级类型灌区渠系并不存在严格意义上的水系分维特征。但其作为表征灌区渠系形态的重要综合指标，不失为分析渠系水利用系数提供了一个途径。因为渠系水利用系数决定着灌区灌溉水有效利用系数的高低，渠系水利用系数的高低与渠系的长度、衬砌与否、地下水位和土壤质地等有很大的关系，而渠系特征可从一个方面来反映渠系输配水结构的合理与否。因此，从提高灌溉水有效利用系数的角度出发，灌区渠系过高或过低的分维值 $D$ （主要由分枝比 $R_b$ 和长度比 $R_L$ 决定）都不利于用水效率的提高，基于此，寻求相对最佳的分维值 $D$ 对于提高用水效率就具有重要的理论和现实意义。通过对不同层级类型样点灌区的灌溉水有效利用系数与 $D$ 值进行相关性分析，作散点图1，以分析其总体趋势性变化规律。

从图1中四级渠系类样点灌区灌溉水有效利用系数与 $D$ 值散点图分布可以看出，除2个奇异点之外，整体表现出随 $D$ 值增大灌溉水有效利用系数同步减小的趋势和较为明显的大开口抛物线特征（ $R^2=0.5973$ ），说明在分枝比和长度比两者表征关系存在一个拐点，随 $D$ 值的增大，灌溉水有效利用系数先减小后增大的一个总体特征，趋势拐点为（2.208，0.399），说明随着灌区的分枝比的提高，灌溉水有效利用系数反而出现降低的现象，部分渠道在功能上是相对无效和冗余的，更多更细化的渠系并不利于灌溉水有效利用系数

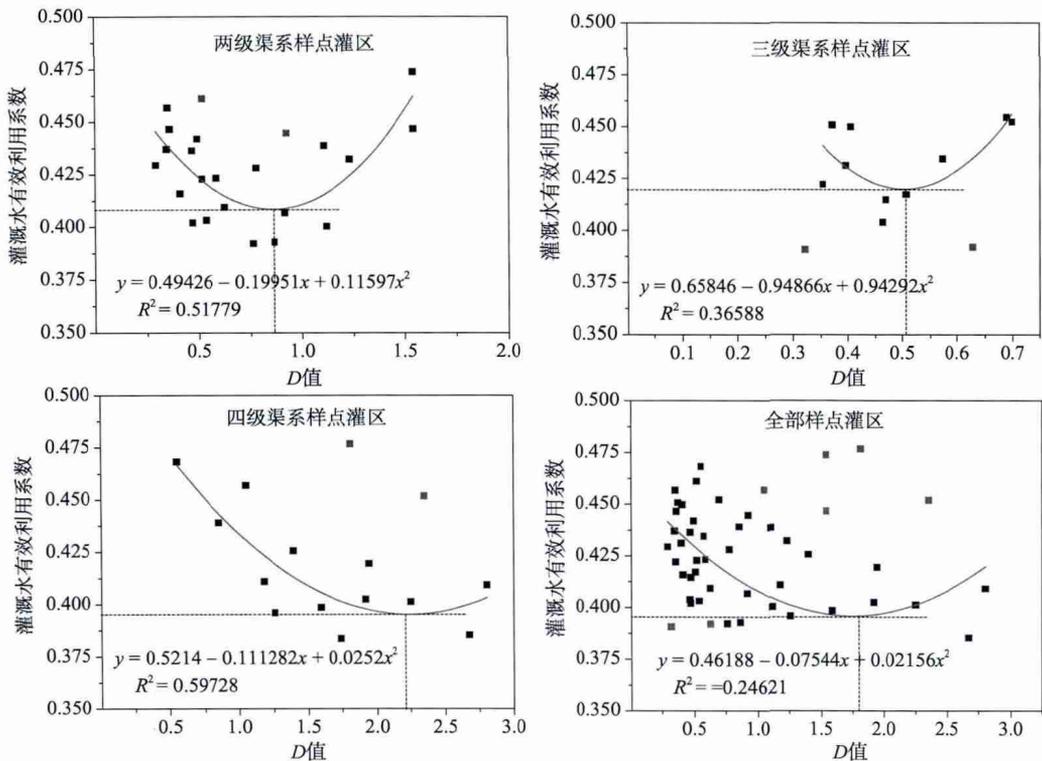


图1 各级渠系样点灌区灌溉水有效利用系数与D值散点图

Fig.1 Scatter chart of effective utilization coefficient of irrigation water and D values with canal system at all levels classified sample irrigation district

的提高,而要通过渠系改造,增加输水能力,减少渗漏蒸发等渠系水量损失来提高。

两级渠系类样点灌区的灌溉水有效利用系数与 $D$ 值散点分布也表现出较明显的抛物线形态( $R^2=0.5178$ ),趋势拐点为(0.860, 0.409),即在灌区渠系分级较少,渠系结构简单的情况下,一定程度上增加渠系的分枝比,能使得水量更快捷高效地输送到田间,对于整个灌区的灌溉水有效利用系数的提高有促进作用。

而三级渠系类样点灌区的灌溉水有效利用系数与 $D$ 值散点图表现没有明显的形态特征,分布较为分散,总体上也相对表现出弱抛物线形态( $R^2=0.3659$ ),趋势拐点为(0.503, 0.420),只是与两级渠系相比,随 $D$ 值增大,灌溉水有效利用系数同步增大的趋势更明显一些。这也同时表明,该类型灌区应进一步提高分枝比,提高渠系发展系数将更有利于提高灌区的灌溉水有效利用系数。

最后,通过对全部样点灌区灌溉水有效利用系数与 $D$ 值的散点图进行分析,发现其分布呈一个带状的水平分布,在 $D$ 值为0.50处灌区分布密集分布,这主要因为较小规模的两级渠系类灌区占比较高,占全部样点灌区个数的近一半,而其他地方呈水平均衡分布,也能发现较弱的抛物线特征( $R^2=0.246$ ),趋势拐点为(1.748, 0.396)。

通过对各级渠系类样点灌区的拟合趋势线从形态上分析,发现有如下规律:①抛物线形态的顶点 $X$ 坐标(趋势拐点也即 $D$ 值)与灌区渠系分级的关系为:三级渠系类灌区(0.503) < 两级渠系类灌区(0.860) < 四级渠系类灌区(2.208),三级渠系类灌区的趋势拐点 $D$ 值最小,而对应的灌溉水有效利用系数最大,四级渠系类灌区 $D$ 值最大,而对应的灌溉水有效利用系数最小。说明灌区渠系分级特征与承载其上发挥作用的灌溉水有效利用系数有着相对密切的关联性,体现之一就是渠系的分枝比和长度比的合理区间,三级渠系类灌区的平均分枝比(1.26)小于两级渠系类灌区(1.49)和四级渠系类灌区(3.91),而长度比为三种类型中最大(2.68),导致 $D$ 值最小,而灌溉水有效利用系数为三种分级类型中最大,反观四级渠系类灌区与三级渠系类灌区正好相反,分枝比最大,长度比最小,灌溉水有效利用系数最小。这说明在渠系建设规划中适当提高单位渠道长度,减少渠道分枝,有利于灌溉水有效利用系数的提高。②抛物线形态开口特征,三级渠系类灌区 < 两级渠系类灌区 < 四级渠系类灌区,与 $D$ 值有相同的变化规律,且以顶点为分界,左侧样点分布远多于右侧,说明现状条件下提高样点灌区灌溉水有效利用系数的途径主要以减少渠系分枝,增大渠道长度来实现,并且三级渠系类灌区的变化区间较陡峭,四级渠系类灌区的变化区间较为宽缓。③随着渠系分级的增加,渠系体系越复杂,表现在渠系结构复杂度指标和渠系发展系数指标随着渠系分级数的增加而成倍增大。④渠系特征与灌溉水有效利用系数之间的相关性并不高,也从另一个侧面说明了渠系结构特征只是影响灌溉水有效利用系数的一个方面。渠系形态分布结构对灌区用水和灌溉水有效利用系数作用有着复杂的机理,灌区的地表特征、地形地貌、渠系衬砌、灌区面积、水源特点等都会对渠网的分形产生影响,进而影响到渠系输配水,反应到灌区灌溉水有效利用系数会有较大影响,因此,需要对其量化分析以揭示各因素具体的影响程度。

### 4.3 不同因素对灌溉水有效利用系数的影响

**4.3.1 地貌对灌溉水有效利用系数的影响** 灌区所在的地理位置和地貌等自然条件对灌区供用水、作物种植、灌溉水有效利用系数都有很大的影响,这其中尤其以地貌影响较大,作为本底条件,对灌区的影响主要表现在渠系特征参数的变化上。为此,根据灌区所在区域主要地形特征,按平原、丘陵和山区三种地形类型划分,分析三级渠系类灌区的渠系特征参数与灌溉水有效利用系数的对应关系(图2)。

通过对样点灌区的各类地形因素比较,可以看出灌溉水有效利用系数在各级渠系类型

中并没有规律性的表现,见图2a。其中,两级渠系类灌区表现为平原灌区(0.441) > 丘陵灌区(0.430) > 山区灌区(0.429);三级渠系类灌区表现为丘陵灌区(0.450) > 平原灌区(0.429) > 山区灌区(0.423);四级渠系类灌区表现为山区灌区(0.435) > 丘陵灌区(0.418) > 平原灌区(0.404)的特点。对于相同地貌条件下,渠系结构较简单的灌区和较复杂的灌区表现出基本相反的规律,说明地形类型对灌溉水有效利用系数的影响具有较为直接的作用。丘陵地形和山区地形差异不明显,而与平原地形差异显著,以平原地形下平均灌溉水有效利用系数较高。分析其原因,首先灌区渠道密度,山区地形(62.90) > 丘陵地形(29.26) > 平原地形(22.90),平原地形中小型灌区的单位渠道长度都小于丘陵和山区地表下的相应规模灌区,而在丘陵和山区类型下又以山区地形各规模灌区大于丘陵地形,说明随着灌区地形起伏度的增大,保证同规模灌区所需要的渠道相应增大,而平原地形下灌区分布比较规则,减少了无效渠道输水长度,单位灌溉面积上的渠道长度减少。

**4.3.2 渠系结构对灌溉水有效利用系数的影响** 渠系结构复杂度和渠系发展系数在各级渠系类灌区和不同地形类型下有较一致的关联性,其中,三级渠系类灌区和四级渠系类灌区,两项指标都表现为:平原地形 > 丘陵地形 > 山区地形,而在两级渠系类灌区中,表现为:平原地形 > 山区地形 > 丘陵地形。主要由于该类型灌区面积较小,渠系较简单,对地形的适应表现不明显,尤其是山区和丘陵类型下,差异较小。而渠系密度在两级渠系类灌区和三级渠系类灌区表现为:丘陵地形 > 山区地形 > 平原地形,四级渠系灌区:丘陵地形 > 平原地形 > 山区地形,差异明显。而渠频数指标没有表现出规律性,总体上以平原类型与丘陵和山区类型有相对的差异性。

**4.3.3 渠系衬砌对灌溉水有效利用系数的影响** 作为灌区主要工程和承载用水、配水功能的渠系,其分布、工程状况对灌区灌溉水有效利用系数有直接的作用,而对灌溉水有效利用系数影响最大的因素之一便是灌区的渠道衬砌率的高低。单位灌区衬砌率与灌溉水有效利用系数呈正相关变化,图2b中,单位灌区衬砌率,对于两级渠系类和三级渠系类灌区,两指标都表现为:平原地形 > 丘陵地形 > 山区地形,而四级类型灌区截然相反。因为在两级和三级渠系类灌区,平原地形下小型灌区生产一般条件较好,灌区多为自然经济条件相对较好地区,有能力改善灌区渠道状况,基础条件上的投入力度比较大,使得渠道防冲率相应的较高。而山区限于经济能力,则多以土渠为主。四级渠系类灌区的山区明显大

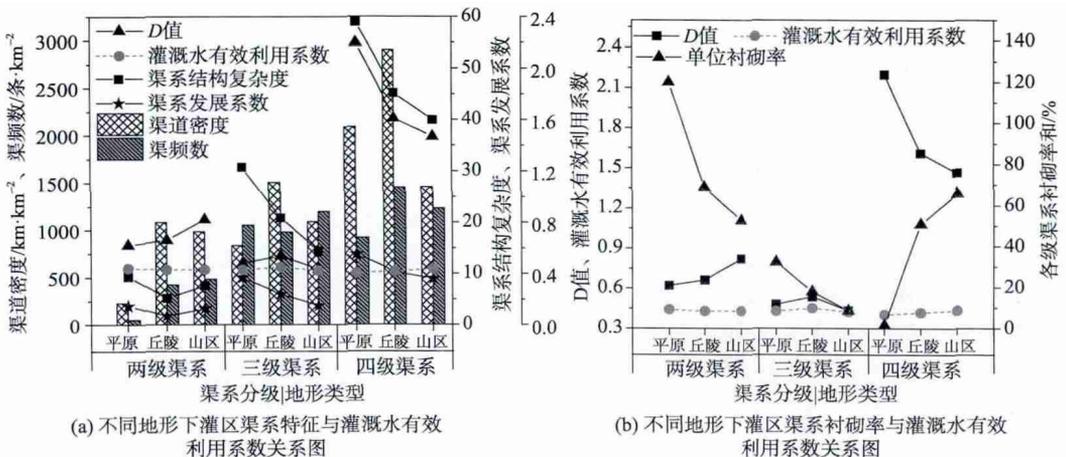


图2 不同地形下各渠系类灌区渠系特征及衬砌率与灌溉水有效利用系数关系对比图  
 Fig.2 Relationship between different terrain features, irrigation canal lining rate and effective utilization coefficient of irrigation water

于丘陵和平原地形，主要因为较大区域的灌区作为地方农村经济主要支撑，将粮食生产和农村经济发展放在优先位置，中型灌区渠道衬砌改造作为基础水利工程，政府投入相对比较倾斜。而平原地区中型灌区分布广泛，相对政府重视和政策性投入没有前两者有优势所导致。单位灌区衬砌率与分维数呈较明显的负相关变化，主要是提高灌区渠系的衬砌率，能有效减少了无效渠道输水损失，因而在渠系改造中规则化渠线，增强过水能力，实际输水长度相应减少，因而导致分维数的减小，变化趋势具有规律性。

图3a为2007-2011各年度灌区每级渠系衬砌率与年度灌溉水有效利用系数的变化趋势图，可以看出，渠系衬砌率逐年提高，但各级渠系的年均提高幅度不同：第一级渠系（干渠3.25%/年）>第二级渠系（支渠2.65%/年）>第三级渠系（斗渠1.54%/年）>第四级渠系（农渠1.03%/年），这与灌区衬砌工程首先以干支渠为主要改造内容有关。图3b为按渠系分级类型划分的单位灌区渠系衬砌率与与年度灌溉水有效利用系数的年度变化趋势图，各级渠系类型灌区的年均提高幅度不同，两级渠系类灌区（6.37%/年）>三级渠系类灌区（7.84%/年）>四级渠系类灌区（6.73%/年），与灌区改造以大型和中型为主有关。同时可以看出，总体而言，随着渠系分级的增加，灌区渠系复杂度的提高，渠系衬砌率与灌溉水利用系数之间的关系越来越密切，决定系数相应提高，显著性趋强；方程直线的斜率增大，对灌溉水利用系数的贡献作用变大。

利用2007-2011年间样点灌区数据建立各级渠系衬砌率与灌溉水有效利用系数的回归方程，见式(11)~式(13)。

两级渠系类灌区衬砌率与灌溉水有效利用系数：

$$\eta_2 = 0.37055 + 0.0007481x_2 \quad R^2 = 0.88826 \quad F = 31.796 \quad P = 0.0049 \quad (11)$$

三级渠系类灌区衬砌率与灌溉水有效利用系数：

$$\eta_3 = 0.39144 + 0.0008540x_3 \quad R^2 = 0.91994 \quad F = 45.996 \quad P = 0.0025 \quad (12)$$

四级渠系类灌区衬砌率与灌溉水有效利用系数：

$$\eta_4 = 0.37375 + 0.0009772x_4 \quad R^2 = 0.95279 \quad F = 80.732 \quad P = 0.0008 \quad (13)$$

4.3.4 灌区规模对灌溉水有效利用系数的影响 作为灌区规模与类型划分的基本参数，面积尺度也对灌溉水有效利用系数有着直接作用，通过对2007-2011年各样点灌区灌溉水有效利用系数的分类统计发现，在灌区规模上表现出大型灌区(0.39) < 中型灌区(0.42) <

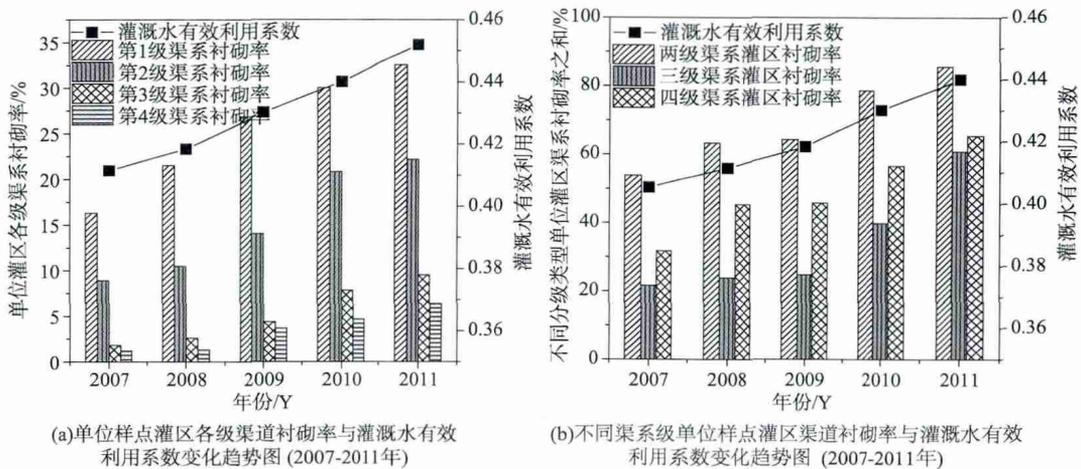


图3 2007-2011年灌区渠道衬砌率与灌溉水有效利用系数变化趋势图

Fig.3 Irrigation canal lining rate and effective utilization coefficient of irrigation water change trends from 2007 to 2011

小型灌区 (0.47) 的一般性规律, 即随着灌区规模和面积的减小, 灌溉水有效利用系数增大。因为对以地表为灌溉水源而言, 在不考虑大尺度地下回归水重复利用情况下, 灌区规模面积越大, 各级渠系长度也就相应越大, 输水过程的损失也就越大 (渠系输水损失与渠系长度正相关), 造成灌溉水有效利用系数下降。针对各级渠系类灌区而言, 去掉大型灌区的影响, 灌区面积/灌溉水有效利用系数表现为: 两级渠系类灌区 (15.40 km<sup>2</sup>/0.431)、三级渠系类灌区 (28.00 km<sup>2</sup>/0.432) 和四级渠系类灌区 (61.00 km<sup>2</sup>/0.422), 表现很明显。

**4.3.5 不同影响参数对灌溉水有效利用系数影响的量化分析** 通过分析和选取对灌区灌溉水有效利用系数有直接作用的主要渠系属性参数, 按类型和作用关系主要有以下五类: 面积尺度属性参数  $X_1$  选择灌区当年有效灌溉面积指标, 渠系分维特征属性参数  $X_2$  选择渠系分维值  $D$  指标, 渠系结构属性参数  $X_3$  选择渠系结构复杂度指标, 渠系工程状况属性参数  $X_4$  选择单位灌区渠系衬砌率指标, 下垫面属性参数  $X_5$  选择地形地貌指标。其中地貌指标按平原赋值 1, 丘陵赋值 2, 山区赋值 3 进行量化处理, 按三级渠系类灌区计算平均指标值, 采用最小二乘回归分析法, 计算得到模型效应和因变量权数及标准回归系数见表 2。

表 2 各参数指标权重系数  
Tab. 2 Weight coefficient of each parameter index

组分	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
模型效应和因变量权数	-0.5392	-0.5535	-0.5189	0.1084	-0.3554
标准回归系数	-0.2934	-0.3130	-0.2791	0.0335	-0.2195

建立灌区灌溉水有效利用系数与各属性参数的回归方程:

$$y_{\text{灌溉水有效利用系数}} = 0.44485 - 0.000686X_1 - 0.00268X_2 - 0.000067X_3 + 0.000006X_4 - 0.00464X_5 \quad R^2 = 0.9923 \quad (14)$$

从回归方程可以看出, 各指标排序为: 渠系工程状况属性参数 > 下垫面属性参数 > 渠系结构属性 > 面积尺度属性参数 > 渠系分维特征属性参数。渠系工程状况属性参数为正向最大权重, 渠系分维特征参数为负向最大权重。而绝对影响权重表现为: 渠系分维特征属性参数 > 面积尺度属性参数 > 渠系结构属性 > 下垫面属性参数 > 渠系工程状况属性参数, 渠系分维数与灌溉水有效利用系数的相关权重最大, 而渠系工程状况最小, 符合一般规律。

**4.4 灌区渠系分形结构的现实指导意义**

通过对灌区和灌溉水有效利用系数应用水系和分形的特征和方法进行分析, 有如下现实指导意义: ① 在保证灌区灌溉用水量前提下, 当渠系结构符合分形特征系统时, 其所需要的理论渠道长度最小, 因而使得灌区在新建或改造时的工程投资最少, 能使得投资优化。② 具有分形结构的灌区渠网系统便于灌区实行分级分层次管理, 现行灌区各级渠道的分级管理也正是如此, 即灌区管理处只负责管理和维护干渠及支渠级渠道, 而之后各级渠道归当地村委和用水协会管理。这种管理形式和灌区的变尺度分形结构有关, 相对与全部层次直接由灌区管理单位或用水农户进行管理要有效、简单和可行, 能使得灌区的工程设施和用水管理高效化。③ 灌区分形结构是一种在自然适应状态下的自生长过程中产生的, 其本身就具有较为良好的生长特性。因此, 针对不同规模和不同渠系分布特征的灌区, 对其现状各级渠系配置的合理性进行分析, 并按照自生长和提高灌溉水有效利用系数的目标进行改造, 有利于更有效地发挥渠系在输配灌溉水资源, 保证灌区灌溉用水的覆盖面, 提高灌溉水的有效利用系数。因此, 通过分析灌区渠系分形结构和尺度变化, 可以将分形的思想和方法应用到灌区工程规划、设计和管理方面, 有利于优化设计, 提高工程效益, 减少工程投资, 提高管理和用水效能。

## 5 结论与讨论

① 通过对三个级别类型灌区采用Horton 河系定律分析,并计算分维值,发现只有四级渠系类灌区的分枝比 $R_b$ 为3.91, $R_r$ 为2.34, $D$ 值为1.71,符合Horton 河系定律,也即满足自然水系的优化结构。而两级渠系类和三级渠系类灌区的 $D$ 值都小于Horton 河系定律的一般区间。② 通过分析渠系分维结构对灌溉水有效利用系数的影响,发现灌区在不同渠系分级类型下,存在一个相对来说最为合理的分维 $D$ 值和趋势区间,这对指导大中小型不同规模、类型、形态和渠系分级的灌区改造设计提供了重要的技术支撑,有利于节约投资,使得工程效益最优化,对指导工程实践有重要的应用价值。③ 通过对影响灌区灌溉水有效利用系数的主要渠系属性参数进行的定量化分析,发现渠系工程状况属性参数表现为正向贡献(0.0335),其余参数均表现为负向贡献,而以渠系分维特征参数为负向最大(-0.3130)。因此,从改善渠系形态结构方面而言,提高灌溉水有效利用系数的主要途径以提高渠系衬砌率,优化渠系布置措施为主,减少渠系结构上不合理冗余和低效渠系。

本文从灌区渠系分形结构特征对灌溉水有效利用系数的主要影响因素角度进行了分析,结果发现,渠系结构体系的高效布设对灌区灌溉水有效利用系数的贡献应予以高度重视。但影响灌溉水利用率的因素和作用机理比较复杂,在这方面还要综合考虑各方面的因素,具体需要进行更深入的理论研究,揭示其发生发展的关联原因,以发挥渠系系统灌溉输配水的最大效用。

### 参考文献(References)

- [1] 赵军, 单福征, 杨凯, 等. 平原河网地区河流曲度及城市化响应. 水科学进展, 2011, 22(5): 631-637. [Zhao Jun, Shan Fuzheng, Yang Kai, et al. River sinuosity in tidal plain and its response to rapid urbanization. *Advances in Water Science*, 2011, 22(5): 631-637.]
- [2] 余国安, 王兆印, 刘乐, 等. 新构造运动影响下的雅鲁藏布江水系发育和河流地貌特征. 水科学进展, 2012, 23(2): 163-169. [Yu Guo'an, Wang Zhaoyin, Liu Le, et al. Drainage network and fluvial morphology features of Yarlung Tsangpo River under the impact of neotectonic movement. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 163-169.]
- [3] 陈彦光, 李宝林. 吉林省水系构成的分形研究. 地球科学进展, 2003, 18(2): 178-184. [Chen Yanguang, Li Baolin. Studies of the reactal network composition of rivier in Jilin Province, China. *Advanece in Earth Sciences*, 2003, 18(2): 178-184.]
- [4] Mantilla R, Gupta V K, Troutman B M. Extending generalized Horton laws to test embedding algorithms for topologic river networks. *Geomorphology*, 2012, 151-152: 13-26.
- [5] Ricardo Mantilla, Vijay K. Gupta, Brent M. Troutman. Extending generalized Horton laws to test embedding algorithms for topologic river networks. *Geomorphology*, 2012, (15): 13-26.
- [6] Tubau X, Lastras G, Canals M, et al. Significance of the fine drainage pattern for submarine canyon evolution: The Foix Canyon system, Northwestern Mediterranean Sea. *Geomorphology*, 2013, 184(0): 20-37.
- [7] 韩振中, 裴源生, 李远华, 等. 灌溉用水有效利用系数测算与分析. 中国水利, 2009, 20(3): 11-14. [Han Zhenzhong, Pei Yuansheng, Li Yuanhua, et al. Estimation and analysis of effective utilization coefficient of irrigated water. *China Water Resources*, 2009, 20(3): 11-14.]
- [8] 周艳. 分形学理论在城市排水管网中的应用研究. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2007: 45-46. [Zhou Yan. The Reaserch on the application of fractal theory in municipal drainage networks. Xi'an: Chang'an University Degree of Master, 2007: 45-46.]
- [9] 黄奕龙, 王仰麟, 刘珍环, 等. 快速城市化地区水系结构变化特征: 以深圳市为例. 地理研究, 2008, 27(5): 1212-1220. [Huang Yilong, Wang Yanglin, Liu Zhenhuan, et al. Stream construction characteristics in rapid urbanizationarea: Taking Shenzhen City as a case. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1212-1220.]
- [10] 张青年. 逐层分解选取指标的河系简化方法. 地理研究, 2007, 26(2): 222-228. [Zhang Qingnian. Drainage generalization by layered division of the number of retained rivers in river trees. *Geographical Research*, 2007, 26(2):

222-228.]

- [11] Turcotte D L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [12] Batty M. Physical phenomena. Geographical Magazine, 1992, (7): 35-36.
- [13] La Barbera P, Rosso R. On the fractal dimension of streamnetworks. Water Resources Research, 1989, 25 (4): 735-741.
- [14] 杨凯, 袁雯, 赵军, 等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应. 地理学报, 2004, 59(4): 557-564. [Yang Kai, Yuan Wen, Zhao Jun, et al. Stream structure characteristics and its urbanization responses to tidal river system. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 557-564.]
- [15] Veltri M, Veltri P. On the fractal description of natural channel networks. Journal of Hydrology, 1996, 187: 137-144.
- [16] Schuller D J, Rao A P. Fractal characteristics of dense stream networks. Journal of Hydrology, 2001, 243: 1-16.
- [17] Cheng Jicheng, Jiang Meiqiu. Mathematical Models for Drainage Geomorphology. Beijing: Science Press, 1986: 136-146.
- [18] Fac-Beneda J. Fractal structure of the Kashubian hydrographic system. Journal of Hydrology, 2013, 488(0): 48-54.
- [19] La Babera, P Rosso R. Fractal geometry of river networks. Ecos. Trans., AGU, 1987, 68(44): 1276.
- [20] Barbera P La, Rosso R. on the fractal oimeosion of stream networks. Water Resources Research, 1989, 25(4):735- 741.
- [21] David G Tarboton, Rafael L Bras, Ignacio Rodriguez-Iturbe. The fractal nature of river networks. Water Resources Research, 1988, 24(8): 1317-1322.

## Study on the Horton fractal dimension with the irrigation canal system characteristics and effective utilization coefficient of irrigation water

WANG Xiaojun<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, YI Xiaobing<sup>1</sup>, XIAO Mingzhong<sup>2</sup>

(1. Guangdong Institute of Water Resources and Hydropower Research, Guangzhou 510635, China;

2. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** There are many similarities between irrigation canal system and natural river system, therefore, whether the Horton River's law can be applied to the irrigation canal system is a problem worthy of study. In this paper, based on the classification of 53 cases of sample irrigation districts in 2010 in Guangdong Province, the applicability of the Horton River's law to the irrigation canal system is analyzed. It is found that only the fourth class irrigation canal district can meet the Horton River's law. And then the parameters of canal system at all levels of irrigation canal system classes and the value of fractal dimensions are calculated. Furthermore, with the measured data of 2007-2011, the qualitative and quantitative coefficient relationship between the previous results and the irrigation water are analyzed. The results show that: canal project status parameter (0.1084) > land surface parameters (-0.3554) > canal structure parameters (-0.5189) > size scale parameter (-0.5392) > canal fractal characteristic parameters (-0.5536). This study provides a new way for achieving the quantitative characterization of irrigation canal system morphology and characteristics of effective utilization coefficient of irrigation water effects, and the results are of important practical value for guiding planning and construction of irrigation canal and improving the efficiency of water use.

**Key words:** Horton law; canal system; effective utilization; coefficient; irrigation water