

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.018

黑龙江省灌溉用水效率指标体系空间格局研究^{*}

付强 刘巍 刘东 李天霄
(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对黑龙江省灌溉用水效率低下等问题,基于地统计学理论,对黑龙江省灌溉用水效率指标体系及其影响因素的空间分布特征进行研究。结果表明:从全方向上看,田间水利用效率受空间结构的影响最大,其空间正相关范围最大为 145 km;灌溉水利用效率受空间结构的影响次之,空间正相关范围为 124 km;渠系水利用效率受随机因素影响较大,空间正相关范围最小,为 73 km。大庆、哈尔滨、绥化 3 地交界处,灌溉水利用效率、渠系水利用效率与田间水利用效率均出现高值,鸡西的鸡东县 3 个指标值均出现低值。自然因素对灌溉用水效率的影响小于人为因素,其中降水量与灌溉水利用效率、田间水利用效率呈现负相关。

关键词: 黑龙江省 灌溉用水效率 空间格局 地统计学

中图分类号: S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0127-06

Spatial Distribution of Irrigation Water Use Efficiency Index System in Heilongjiang Province

Fu Qiang Liu Wei Liu Dong Li Tianxiao
(College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Heilongjiang Province is one of the most important commodity grain bases in China. Because the territory of Heilongjiang Province is very vast, and the natural conditions and management mode are different, the diversity of irrigation water use efficiency in different regions in Heilongjiang Province is very remarkable. In 2013, the average irrigation water use efficiency in Heilongjiang Province was only 53%, which was lower than the average level in China. Therefore, in order to study the problems of low irrigation water use efficiency in Heilongjiang Province, the spatial distribution and influencing factors of irrigation water use efficiency index system were analyzed according to the geo-statistics theory by using GIS technology. The results showed that for the variation coefficients of all the variables, the intact rate of irrigation engineering was the biggest, and the evapotranspiration was the smallest. The field water use efficiency had the greatest influence; its positive spatial autocorrelation range was 145 km. And the positive spatial autocorrelation range of irrigation water use efficiency was 124 km; the water conveyance efficiency was mainly affected by random factors, its scale of positive spatial autocorrelation was 73 km. The Kriging maps showed that the three indexes had high values in Daqing, Harbin, Suihua Cities and their vicinities. The influence of natural factors was less than that of human factors on irrigation water use efficiency. There were negative correlations respectively between rainfall and irrigation water use efficiency, field water use efficiency. Improving the proportion of irrigation water saving area and the intact rate of irrigation engineering had significant driving to field water use efficiency and the water conveyance efficiency. The study results had important significance to the improvement of water saving in different regions in Heilongjiang Province.

Key words: Heilongjiang Province Irrigation water use efficiency Spatial distribution Geo-statistics

收稿日期: 2015-08-21 修回日期: 2015-09-24

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51479032, 51279031)、水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201301096)、黑龙江省高校长江学者后备支持计划资助项目和黑龙江省水利厅科技资助项目(201318, 201503)

作者简介: 付强, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源系统分析和冻融土壤水热作用机理研究, E-mail: fuqiang0629@126.com

引言

灌溉用水效率是评价灌区灌溉水利用情况的重要依据。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依据^[1-2]。目前,我国广泛使用的灌溉用水效率指标体系根据输水环节不同分为灌溉水利用效率、渠系水利用效率和田间水利用效率^[3-4]。

黑龙江省是我国重要的商品粮基地,2013 年灌溉水利用效率平均值仅为 53%。至 2013 年底,黑龙江省的粮食耕种面积近 $1.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$,地域广阔造成了自然条件和管理方式不同,加之近些年,各地区开展不同程度的耕种面积调整工作,使得不同地区的灌溉水利用效率差异性愈发显著^[5-8]。因此,研究灌溉水利用效率的空间格局特点对于有针对性地提升不同地区灌溉水利用效率具有重要意义。

目前,已有学者对灌溉水利用效率的空间问题展开了研究。熊佳等利用地统计学理论对全国各行政区的灌溉水利用效率的空间分布特征进行了研究^[9];冯保清通过半变异函数,分析了全国大型样点灌区的灌溉水利用效率的空间变异性^[10];崔远来等针对灌溉水利用效率的尺度效应进行了深入研究^[11];王小军等对比分析了广东省灌溉水利用系数与其影响因素的空间分布特点^[12]。纵观之前学者的研究成果,主要针对灌溉水利用效率这一单一指标进行空间结构研究,对于完整的灌溉用水效率指标体系空间结构的研究尚少。因此,本文以北方农业大省——黑龙江省为研究区域,利用地统计学理论对黑龙江省灌溉水利用效率、渠系水利用效率、田间水利用效率及其代表性影响因素进行空间分析,以期提升黑龙江省灌溉用水效率提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

黑龙江省位于中国东北部,属于温带、寒带大陆性季风气候。北部、东南部多为山地,平原海拔高度 50 ~ 200 m,太阳辐射的时空分布特点是南多北少,主要农作物为粳稻。选取 2013 年黑龙江省灌溉用水效率测算分析结果的统计值进行研究,主要数据包括:灌溉水利用效率、渠系水利用效率、田间水利用效率。样点灌区按照大型(大于 2.01 hm^2)、中型($0.067 \sim 2.01 \text{ hm}^2$)、小型($0 \sim 0.067 \text{ hm}^2$)和纯井灌区分类选取,共筛选样点灌区 143 个。其中大型灌区 23 个,中型灌区 36 个,小型灌区 18 个,井灌区 66 个,相邻样点灌区的最大间距为 62 km,分布见图 1。由于大、小兴安岭农业分区因气候条件不适于粳稻生

长,暂不予研究。另外,节水灌溉面积比例、灌区工程完好率的数据源自《黑龙江省水利建设年鉴》、黑龙江省灌溉信息网(<http://www.hljgxx.gov.cn>),当年降水量和腾发量数据源自中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>)。



图 1 黑龙江省样点灌区分布

Fig.1 Irrigation area samples of Heilongjiang Province

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关

空间自相关分析是地统计学中的基本方法之一,它反映了属性值与相邻空间的相关性,是一种检测与量化取样值空间依赖性的统计方法,也是进行空间分析的前提与基础。Moran's I 为空间自相关最常用的表征指标,计算公式为

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \tag{1}$$

式中 I ——Moran's I 值 n ——样点总数
 x_i, x_j ——样点的属性值
 w_{ij} ——空间权重
 $\bar{x}$ ——属性值 x_i 的平均值

Moran's I 值一般介于 $-1 \sim 1$ 之间。当 I 值大于 0 时,表明存在空间正相关,反之,小于 0 表示存在空间负相关, I 值为 0 时,表明不存在空间自相关,空间分布呈现随机分布的情况^[13-14]。

1.2.2 克里金插值

克里金插值又称为空间局部插值法,是在建立半变异函数基础上,对区域变量取值进行线性无偏最优估计的一种方法^[15]。其主要过程包括:①数据处理:检验数据是否有离群值,是否满足正态分布等。②模型拟合:半变异函数 $r(h)$ 是描述区域化变量随机性和结构性的基本手段,定义为区域变量 $Z(x)$ 增量方差的 1/2,其计算公式为

$$r(h) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(x) - Z(x+h))^2 \tag{2}$$

半变异函数中有 3 个重要的参数,即块金值 C_0 、基台值($C_0 + C$)、变程 A_0 ,块金值反映的是变量在最小抽样尺度下的测量误差;随着样点间距离逐渐增大,半

变异函数 $r(h)$ 从初始块金值到达一个相对稳定值, 该值即为基台值; 变程为半变异函数的取值由初始块金值到基台值时, 采样点的间隔距离^[16-19]。③模型检验: 采用统计学中的均方根标准预测误差 (RMMSE) 作为检验插值结果偏离程度的指标^[20]。

2 结果分析

2.1 灌溉用水效率统计参数特征分析

对灌溉用水效率指标体系及其影响因素进行数据检验与修正, 其统计特征值见表 1。通过 SPSS 软件中的 K-S 检验, 指标体系中灌溉水利用效率、渠

系水利用效率、田间水利用效率均服从正态分布, 影响因素中节水灌溉面积比例为对数正态分布, 其他 3 项均满足正态分布。变异系数 C_v 代表数据的离散程度, $C_v \leq 0.1$ 为弱变异性, $0.1 < C_v < 1$ 为中等变异性, $C_v \geq 1$ 为强变异性^[21]。由表 1 可知, 除腾发量为弱变异性, 其他各项指标和影响因素的变异系数分布范围在 0.14 ~ 0.30, 属中等变异; 其中, 灌区工程完好率的 C_v 最高, 为 0.30, 该指标受灌区工程建设情况、运行管理情况等多方面的综合影响, 数据离散度高。这表明受人为影响越多的变量, 其数据的变异程度也越大。

表 1 灌溉用水效率指标体系及影响因素统计特征值

Tab. 1 Statistical characteristics of irrigation water use efficiency index system and its influencing factors								
参数	最大值	最小值	平均值	标准差	偏差系数	峰度系数	分布类型	变异系数
灌溉水利用效率/%	75	26	54	11.03	0.08	0.88	正态	0.20
渠系水利用效率/%	84	36	58	9.08	0.41	0.45	正态	0.16
田间水利用效率/%	88	40	64	15.01	0.15	-1.06	正态	0.23
降水量/mm	726	452	619	90.11	-0.17	-0.53	正态	0.16
腾发量/mm	1164	865	1001	78.41	-0.25	-0.47	正态	0.08
节水灌溉面积比例/%	93	37	49	6.90	1.71	1.89	对数正态	0.14
灌区工程完好率/%	82	36	56	17.12	0.17	-1.09	正态	0.30

2.2 灌溉用水效率指标体系空间特征分析

2.2.1 空间自相关分析

利用 GS + 软件对灌溉用水效率指标体系进行空间自相关分析, 得出全方向 (ISO) 和 0°、45°、90°、135° 4 个方向的 Moran's I 值 (图 2)。图 2a 中, 灌溉水利用效率在各方向上的变化趋势一致, 均随着距离的增加, 自相关程度减弱; 全方向在 124 km 范围内存在空间正相关, 其正相关范围最大的是 0° 方向, 距离为 162 km, 最小的正相关范围为 45° 方向, 距离为 89 km, 说明 0° 方向对灌溉水

利用效率的空间自相关性影响较大。图 2b 中, 各方向上的渠系水利用效率的自相关曲线相似度很高, 均在 73 km 范围内存在空间正相关。图 2c 中, 全方向上, 田间水利用效率在 145 km 范围内存在空间正相关, 其中 45° 方向, 随着距离增大, 空间负相关性逐渐加强。对比 3 个指标, 田间水利用效率的空间正相关范围最大, 渠系水利用效率的最小, 这表明田间水利用效率受空间结构的影响最大, 渠系水利用效率受空间结构的影响程度最小。

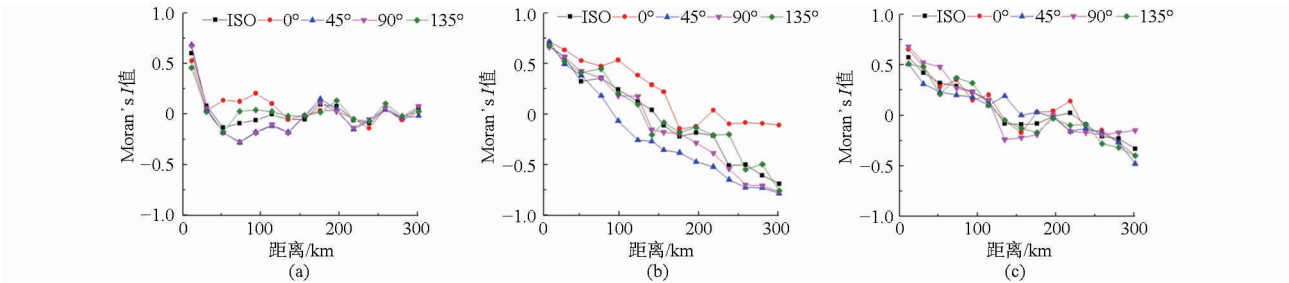


图 2 灌溉用水效率指标体系空间自相关图

Fig. 2 Spatial autocorrelation of irrigation water use efficiency index system

(a) 灌溉水利用效率 (b) 渠系水利用效率 (c) 田间水利用效率

2.2.2 空间变异性分析

利用 GS + 软件, 对灌溉用水效率指标体系进行半变异函数拟合, 并对拟合模型进行检验, 结果见表 2。全方向上, 灌溉水利用效率与田间水利用效率均选取指数模型为最优, 渠系水利用效率选取球状

模型, 3 个最优模型的 R^2 值均在 0.85 以上, RMMSE 均接近 1, 表明选取的拟合模型预测精度较高; 在 3 个效率指标中, 渠系水利用效率的 C_0 与 $C_0/(C_0 + C)$ 均为最高, 田间水利用效率均为最小, 说明渠系水利用效率的空间变化由随机部分引起的变异性程度较

大,而田间水利用效率主要是由结构性因素(气象、地理、地质等)引起的空间变异性。在不同方向上,3个指标的 A_0 值均不同,这表明灌溉用水效率指标体系存在空间各向异性;在各方向上,各指标的 A_0 值与2.2.1节中空间正相关范围均有所不同^[22],其中田间水利用效率的 A_0 与正相关范围差异最为显

著。这是由于空间自相关分析与空间变异性分析这2种分析方法表达出的空间相关性程度不同,前者能够看出正相关与负相关的分界范围,而后者能够通过 A_0 值同时表示出正相关与负相关的整体相关范围,2种分析方法相结合,有利于全面分析灌溉用水效率指标体系的空间结构特征。

表 2 灌溉用水效率指标体系半变异函数模型

Tab.2 Semi-variance models for irrigation water use efficiency index system and its influencing factors								
指标	方向/(°)	模型类型	C_0	$C_0 + C$	$C_0/(C_0 + C)$	A_0/km	R^2	RMMSE
灌溉水利用效率	ISO	指数	4.32	13.51	0.32	138	0.885	1.06
	0	指数	2.76	4.84	0.57	268	0.701	1.62
	45	指数	5.22	6.14	0.85	328	0.666	3.38
	90	指数	4.98	26.21	0.19	297	0.814	2.11
	135	指数	2.07	3.34	0.62	301	0.590	3.08
渠系水利用效率	ISO	球状	12.61	22.12	0.57	75	0.857	1.38
	0	球状	10.77	63.35	0.17	152	0.610	7.62
	45	球状	12.14	16.18	0.75	155	0.492	8.84
	90	球状	8.23	8.95	0.92	147	0.503	8.50
	135	球状	12.42	19.11	0.65	121	0.652	6.91
田间水利用效率	ISO	指数	2.70	11.26	0.24	203	0.915	1.02
	0	球状	4.10	27.33	0.15	357	0.570	9.76
	45	指数	5.20	8.81	0.59	382	0.510	11.22
	90	指数	3.79	5.26	0.72	331	0.735	1.36
	135	指数	3.10	10.00	0.31	270	0.885	1.06

2.2.3 灌溉用水效率指标体系空间分布

利用 ArcGIS 10.1 软件中地统计学模块 (Geostatistical analysis) 对黑龙江省灌溉用水效率指标体系进行空间插值,得到空间分布图(图3)。整体上看,灌溉用水效率指标体系的空间分布较为复杂。全省灌溉水利用效率在35%~45%区间的覆盖面积最大,达43%,灌溉水利用效率在25%~35%区间所占面积最小,仅为8.9%;65%~75%的灌溉水利用效率高值区的覆盖面积为21%,主要出现在齐齐哈尔与绥化交界处、哈尔滨南部、佳木斯西部以及双鸭山、鸡西部分地区。渠系水利用效率在45%~55%区间的覆盖面积最大,为31%,75%~85%的渠系水利用效率高值区出现在齐齐哈尔、绥化、大庆的交界处,35%~45%的渠系水利用效率低值区集中在黑龙江省东

南部的鸡西、七台河、牡丹江部分地区及西南部的大庆、齐齐哈尔部分地区;整体上看,渠系水利用效率与灌溉水利用效率的空间格局较为相似。田间水利用效率整体上呈现出西高东低、南高北低的趋势特征,78%~88%的田间水利用效率高值区集中在齐齐哈尔、大庆交界处的富裕县、林甸县、依安县等部分地区,38%~48%的渠系水利用效率低值区出现在鸡西中部。对比灌溉水利用效率、渠系水利用效率与田间水利用效率的空间分布图,可以看出高值区均出现在大庆、齐齐哈尔、绥化交界处;鸡西西部的鸡东县3个效率指标均出现了最低值;鸡东县主要灌区为鸡东灌区,该灌区共有7个分区,属于大型灌区,水田灌溉面积占总面积的72%。大型灌区灌溉用水效率目前偏低是黑龙江省普遍存在的主要问题之一。

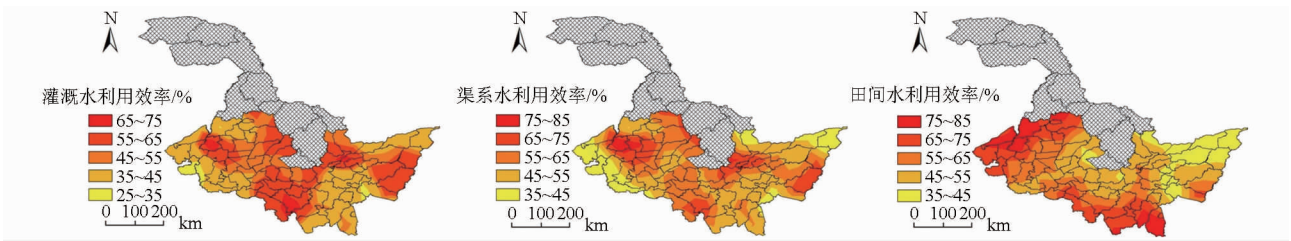


图 3 灌溉用水效率指标体系空间分布

Fig.3 Spatial distribution of irrigation water use efficiency index system

2.3 灌溉用水效率影响因素空间分布

灌溉用水效率的影响因素主要分为自然因素和人为因素,基于数据获取的难易程度,本文筛选出灌区 2013 年降水量、腾发量和节水灌溉面积比例、灌区工程完好率分别作为自然与人为影响因素的代表进行分析。其中,降水量代表自然气候条件的影响,腾发量代表气象因子与地理纬度的影响,节水灌溉面积比例代表技术层面的影响,灌区工程完好率代表工程管理措施的影响。根据 143 个样点灌区的统计资料,计算各影响因素与灌溉用水效率指标体系的相关系数(表 3)。可以看出,人为因素较自然因素对灌溉用水效率指标体系的影响大。其中降水量与灌溉水利用效率、田间水利用效率呈现负相关,其

表 3 影响因素与灌溉用水效率指标体系相关系数
Tab.3 Correlation coefficient of influencing factors and irrigation water use efficiency index system

指标	降水量	腾发量	节水面积比例	灌区工程完好率
灌溉水利用效率	-0.230	0.272	0.241	0.417 *
渠系水利用效率	0.081	0.161	0.236	0.612 **
田间水利用效率	-0.210	0.312	0.533 *	0.219 *

注: * 为 $p < 0.05$ 水平差异显著, ** 为 $p < 0.01$ 水平差异显著。

他均为正相关。

对各影响因素进行克里金空间插值(图 4)。全省降水量自西向东呈现低-高-低的变化趋势,对比降水量与灌溉水利用效率分布图,除哈尔滨南部地区两者出现明显正相关,其他地区均呈现负相关或相关性不显著;宏观上看,降水量越大,灌溉水利用效率越低。腾发量的空间带状分布规律明显,自西南方向至东北方向逐渐递减,其分布与灌溉水利用效率空间分布图相似性不明显,但其大部分地区与田间水利用效率的空间分布较为相似。节水灌溉面积比例的空间分布与田间水利用效率的相似度较高,这是由于黑龙江省控制灌溉技术逐步普及,该技术主要针对田间作物生育期的水量进行调控,减少不必要的渗漏损失,进而达到节水灌溉的目的,因此,该指标的提升对于田间环节的节水具有主要推动作用。灌区工程完好率与渠系水利用效率的空间分布相似性显著;全省灌区工程完好率普遍偏低,68% 的地区灌区工程完好率在 55% 以下,其中鸡西、七台河交界地区出现最低值,由此看出,黑龙江省普遍存在灌区养护管理工作不到位的问题,致使大部分灌区的基础工程年久失修,造成了不必要的水量损失。

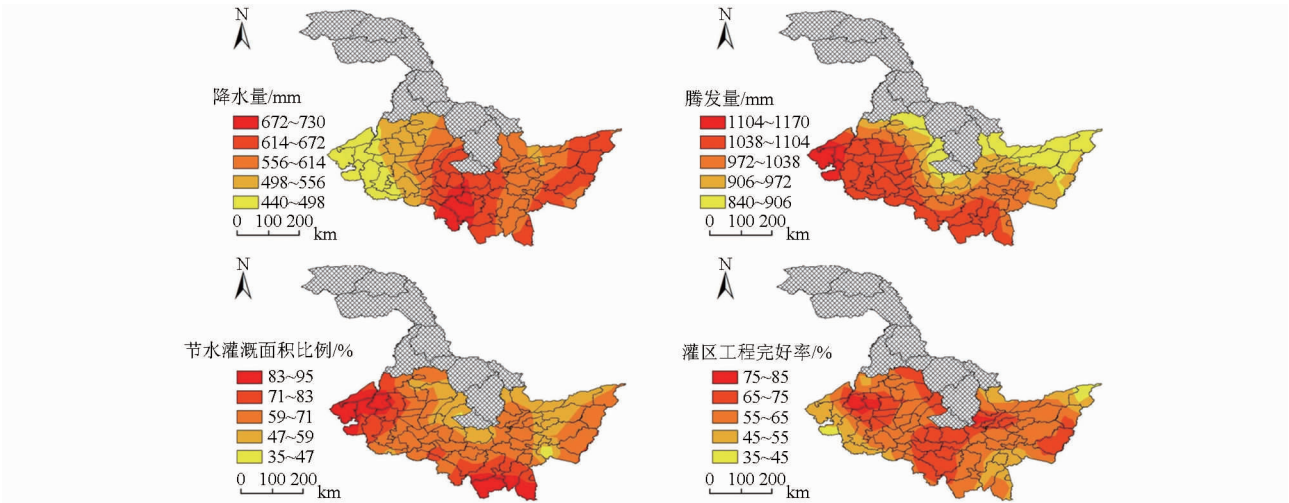


图 4 灌溉用水效率影响因素空间分布
Fig.4 Spatial distribution of influencing factors for irrigation water use efficiency

3 结论

- (1)除腾发量为弱变异性,其他各项指标和影响因素的变异系数分布范围在 0.14 ~ 0.30,属中等变异;灌区工程完好率的变异系数最高,为 0.30,该指标受灌区工程运行管理情况等多方面的综合影响,数据离散度高。
- (2)田间水利用效率的空间自相关范围最大,渠系水利用效率的最小。田间水利用效率主要受空

- 间结构的影响,而渠系水利用效率受随机部分的影响较大;黑龙江省灌溉用水效率指标体系的高值均集中在大庆、哈尔滨、绥化 3 地的交界处,低值均出现在鸡东县的大部分地区。
- (3)人为因素较自然因素对 3 个指标的影响大,其中降水量与灌溉水利用效率、田间水利用效率呈现负相关,其他均为正相关。提高节水灌溉面积比例和灌区工程完好率分别对提升田间水利用效率和渠系水利用效率具有显著驱动作用。

参 考 文 献

- 1 贾宏伟,郑世宗. 灌溉水利效率的理论、方法与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- 2 茆智. 灌溉用水有效利用系数测算分析有助于进一步明确农业节水的主攻方向[J]. 中国水利,2009(3):5-6.
- 3 崔远来,熊佳. 灌溉水利效率指标研究进展[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)
- 4 蔡守华,张展羽,张德强. 修正灌溉水利效率指标体系的研究[J]. 水利学报,2004,35(5):111-115.
Cai Shouhua, Zhang Zhanyu, Zhang Deqiang. Modified index system for utilization efficiency of irrigation water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(5): 111-115. (in Chinese)
- 5 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.
- 6 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 of factors affecting the efficiency utilization coefficient of irrigation water in Guangdong[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 6-11. (in Chinese)
- 7 谭芳,崔远来,王建漳. 灌溉水利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)
- 8 王小军,贺瑞敏,尚慢廷. 气候变化对区域农业灌溉用水影响分析[J]. 中国农村水利水电,2011(1):29-32, 36.
Wang Xiaojun, He Ruimin, Shang Manting. Research on regional irrigation water demand under climate change[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(1):29-32, 36. (in Chinese)
- 9 熊佳,崔远来,谢先红. 灌溉水利效率的空间分布特征及等值线图研究[J]. 灌溉排水学报,2008,27(6):1-5.
Xiong Jia, Cui Yuanlai, Xie Xianhong. Spatial distribution of irrigation water use efficiency and its isogram[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6):1-5. (in Chinese)
- 10 冯保清. 全国大型灌区灌溉用水有效利用系数空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报,2012,31(6):42-44.
Feng Baoqing. Spatial variability of irrigation efficiency of nationwide large-scale irrigation systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6):42-44. (in Chinese)
- 11 崔远来,李远华,陆垂裕,等. 灌溉用水有效利用系数尺度效应分析[J]. 中国水利,2009(3):18-21.
Cui Yuanlai, Li Yuanhua, Lu Chuiyu, et al. Scale effect of effective utilization coefficient of irrigated water[J]. China Water Resources, 2009(3):18-21. (in Chinese)
- 12 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)
- 13 杨慧. 空间分析与建模[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- 14 刘吉平,吕宪国,崔炜炜. 别拉洪河流域湿地变化的多尺度空间自相关分析[J]. 水科学进展,2010,21(3):392-398.
Liu Jiping, Lü Xianguo, Cui Weiwei. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale changes in Bielahong River basin wetlands [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3):392-398. (in Chinese)
- 15 刘爱利,王培法,丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京:科学出版社,2012.
- 16 闫佰忠,肖长来,乔雨,等. 不同时间尺度吉林市地下水位混沌特性与空间分布[J]. 农业机械学报,2015,46(1):138-147.
Yan Baizhong, Xiao Changlai, Qiao Yu, et al. Multiple timescale chaos identification of groundwater depth and subdivision of Jilin City based on 0-1 test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):138-147. (in Chinese)
- 17 黄魏,韩宗伟,罗云,等. 基于地形单元的土壤有机质空间变异研究[J]. 农业机械学报,2015,46(4):161-167.
Huang Wei, Han Zongwei, Luo Yun, et al. Spatial distribution of soil organic matter based on topographic unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):161-167. (in Chinese)
- 18 王卫华,王全九,张志鹏. 流域尺度土壤导气率空间分布特征及其影响因素分析[J]. 农业机械学报,2014,45(7):118-124.
Wang Weihua, Wang Quanjiu, Zhang Zhipeng. Basin scale spatial distribution of soil air permeability and analysis of its impact factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7):118-124. (in Chinese)
- 19 王琳. 浙江省三个主要农业地貌区土壤与稻谷微量元素空间变异规律研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- 20 陈涛,常庆瑞,刘钊,等. 耕地土壤有机质与全氮空间变异性对粒度的响应研究[J]. 农业机械学报,2013,44(10):122-129.
Chen Tao, Chang Qingrui, Liu Zhao, et al. Spatial variability response of farmland soil organic matter and total nitrogen to sampling grain size[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):122-129. (in Chinese)
- 21 Faber D S, Korn H. Applicability of the coefficient of variation method for analyzing synaptic plasticity[J]. Biophysical Journal, 1990, 60(5):1288-1294.
- 22 Rezaur R B, Rahardjo H, Leong E C. Spatial and temporal variability of pore-water pressures in residual soil slopes in a tropical climate[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(3): 317-338.