

基于 AHP 和 ArcGIS 的北京市农业节水区划研究

范海燕¹ 朱丹阳² 郝仲勇^{1,3} 杨胜利^{1,3} 张娟^{1,3} 岳海英^{1,3}

(1.北京市水科学技术研究院,北京 100048; 2.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083;

3.北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心,北京 100048)

摘要:在总结国内外学者农业节水分区先进经验的基础上,结合北京市农业生态节水发展实际,充分考虑自然条件、水资源状况、工程管理和社会经济状况等,构建涵盖干旱指数、地下水超采、土壤类型、节水灌溉率、农民人均收入在内的北京市农业节水分区指标体系,分析各指标空间分布规律,界定各指标的分级标准,并划定相应分区。采用层次分析法(AHP)对各指标分级赋值,利用 ArcGIS 软件中的叠加分析功能将图层按权重叠加,对分区重分类并相应赋值,将各影响因素的分值和权重相乘并求和得到最终的评分结果,按照评分结果将北京市划分为农业节水优先发展区、农业节水适宜发展区和农业节水鼓励发展区,根据分区结果提出相应工程节水及农艺节水措施。

关键词:农业节水分区;北京市;指标体系;层次分析法;ArcGIS

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0288-06

Agricultural Water-saving Zoning in Beijing Based on AHP and ArcGIS

FAN Haiyan¹ ZHU Danyang² HAO Zhongyong^{1,3} YANG Shengli^{1,3} ZHANG Juan^{1,3} YUE Haiying^{1,3}

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China

2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Beijing Engineering Research Center for Non-conventional Water Resources Utilization and Water Saving, Beijing 100048, China)

Abstract: A model system was proposed based on the advanced experience at home and abroad, which was applied to agricultural water-saving zoning. The reality of agricultural water saving, water resources distribution, natural conditions, agricultural water management, project management level and pecuniary condition in Beijing were also included in this model system. The model system included several indices and each index was defined based on index categorization. These indices were also used to present the aridity soil type and ground water index distribution in the corresponding zoning. Meanwhile, ArcGIS was also combined based on the function of superposition analysis and analytic hierarchy process (AHP). The ArcGIS analysis function in each lay was defined and the weight function on each function was also defined. Through the definition, the index value on each lay and each function can be obtained. After that, the index value can be scored and classified and also multiplied with each index weight. The multiplied values were the final value result and treated as overall value which was treated as the guided line for Beijing agriculture water-saving zoning classification. Through the model system classification results, Beijing was divided into agricultural water conservation priority development area, agricultural water saving suitable development area and agricultural water saving encouraging development area. According to the model system results, the corresponding engineering measures and agronomic measures were also recommended in water-saving and can partly help the decision-maker in Beijing to optimize the agricultural water saving.

Key words: agricultural water-saving zoning; Beijing; index system; chromatography analysis method; ArcGIS

引言

近年来,诸多学者对各地区农业节水分区开展

了系统研究,通过采用定量计算与传统经验定性相结合、模糊数学聚类分析、模糊-动态聚类、主成分分析与系统聚类相结合、主成分分析与模糊聚类相结

合、主成分分析与模糊 C-均值聚类算法相结合等方法,划定了不同地区农业节水分区,并取得一定的研究成果^[1-15]。农业节水分区经历了由定性分析到定量分析的过程,但定量分析多以聚类分析法、模糊聚类法、动态聚类法和系统聚类法为主,层次分析法用于农业节水分区的研究及应用相对较少。层次分析法是根据各影响因素两两比较得出的权重结果,结合科学的分值赋予得出的综合评价方法,是定性分析与定量分析结合评价的一致矩阵法^[16-18],主要原理为各影响因素根据影响程度两两比较,根据矩阵计算的方法将两两比较结果转化为同一标度下的比较结果,得到合理的权重分配,提高评价的准确度。

本文在综合分析气候条件、土壤类型、管理水平、社会经济状况等诸多因素的基础上,构建指标体系,采用层次分析法与 ArcGIS 软件叠加功能,划定北京市农业节水分区。

1 方法与步骤

1.1 指标体系构建

参照已有研究成果,本研究在分区指标的选取上考虑自然条件、灌溉情况及经济社会状况等方面。结合北京市当前农业节水发展现状和条件,拟采用以下多种影响因素建立指标体系:

(1) 干燥度指数 X_1

干燥度指数是蒸发量与降水量的比值,是反映气候干旱程度的重要指标,其表达式为

$$X_1 = \frac{ET_0}{P} \quad (1)$$

式中 P ——年降水量,mm

ET_0 ——年潜在蒸发量,mm

(2) 地下水超采区 X_2

一般以年均地下水水位下降速率 Δh (m/a) 作为判别地下水超采区的依据。计算公式为

$$X_2 = \Delta h = (h_i - h_e) / \Delta t \quad (2)$$

式中 h_e ——时段初的地下水水位,m

h_i ——时段末的地下水水位,m

Δt ——时段的长度,a

(3) 土壤类型 X_3

不同土壤类型其土壤渗透系数及持水性均不同,土壤类型直接影响作物的种类以及用水效率。

(4) 节水灌溉率 X_4

节水灌溉率以节水灌溉面积与耕地面积之比表示。

(5) 农民人均纯收入 X_5

农民人均纯收入是指农户一年中的农业人均年

收入。

1.2 指标分级标准确定

(1) 干燥度指数

以北京市 2014 年各区降水量、风速、平均温度、相对湿度等气象资料为基础,计算得北京市各区农业气象干燥度指数在 1.79 ~ 3.40 之间,依据中国气候区划干湿指标划分标准:干燥度指数 $X_1 < 1.0$ 为湿润地区; $1.0 \leq X_1 < 1.5$ 为半湿润地区; $1.5 \leq X_1 < 4.0$ 为半干旱区; $4.0 \leq X_1 < 16.0$ 为干旱区; $X_1 \geq 16.0$ 为极端干旱区^[19-20],结合北京市实际情况,将北京市各地区干燥度指数平均划分为 4 个等级,如表 1 所示,干燥度指数分布图见图 1。

表 1 北京市干燥度指数等级划分

Tab.1 Grade division of aridity index in Beijing

分区等级	I	II	III	IV
干燥度指数	1.5 ~ 2.1	2.1 ~ 2.7	2.7 ~ 3.3	3.3 ~ 4.0

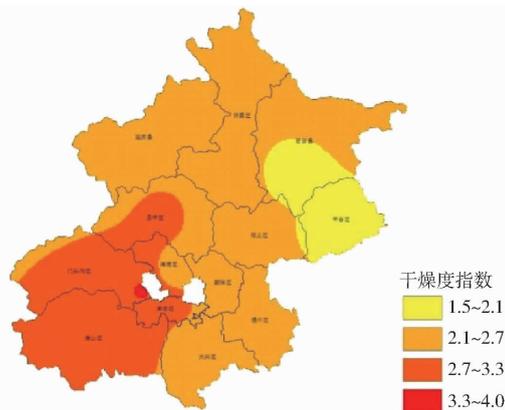


图 1 干燥度指数分布图

Fig.1 Distribution map of aridity index

(2) 地下水超采区

依据 SL 286—2003《地下水超采区评价导则》^[21]中地下水超采区分级标准,年均地下水水位下降速率 Δh 均为正值的区域,则地下水补给量大于开采量,为补给区; Δh 为负值的区域,则地下水补给量小于开采量,为超采区。结合北京市各地区地下水水位下降程度,将北京市划分为 4 个区,划分情况详见表 2,地下水超采区分布见图 2。

表 2 地下水超采区划分

Tab.2 Grade division of groundwater overdraft area

分区等级	类型	划分原则
I	基本平衡区、补给区	$\Delta h \geq -0.5 \text{ m/a}$
II	弱超采区	$-1.0 \text{ m/a} \leq \Delta h < -0.5 \text{ m/a}$
III	一般超采区	$-2.0 \text{ m/a} \leq \Delta h < -1.0 \text{ m/a}$
IV	严重超采区	$\Delta h < -2.0 \text{ m/a}$

(3) 土壤类型

北京市土壤类型复杂多样,包括重土、粘质土、

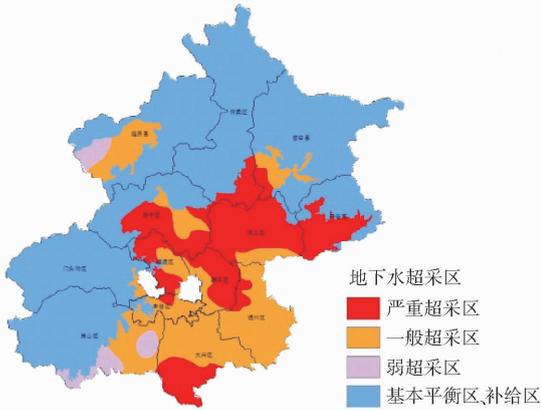


图2 北京市超采区域分布图

Fig.2 Distribution map of groundwater overdraft area

粘壤质、中壤质、轻壤质、沙壤质、砂质土、松砂土、砂砾、岩石、卵石滩等,考虑到利于作物生长及水分有效利用、方便后续分区计算等因素,将北京市土壤类型重新归类,划分为4个区,划分情况详见表3,土壤类型分布见图3。

表3 土壤类型等级划分

Tab.3 Grade division of soil types

分区等级	类型	划分情况
I	中、粘壤土	中壤质、粘壤质、粘质、粘重土
II	轻壤土	轻壤质
III	砂质土	沙壤质、砂质
IV	砂岩	砂土、砂砾、岩石、卵石滩

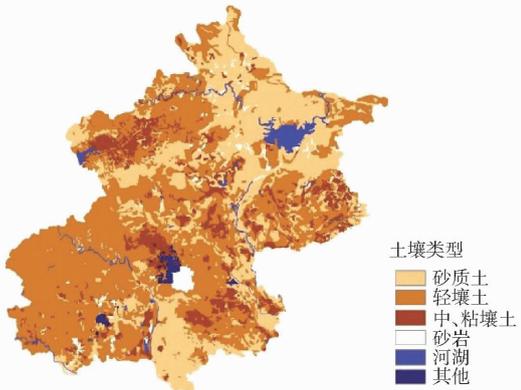


图3 土壤类型分布图

Fig.3 Distribution map of soil types

(4) 节水灌溉率

节水灌溉率直接反映农业节水推广普及情况,是农业节水灌溉面积占耕地面积的比例。北京市农业节水灌溉率分布不均从而节水灌溉率也成为农业节水灌溉的重要指标之一,根据《北京市水务统计年鉴(2014)》^[22]中农业节水灌溉率指标和节水灌溉率现状,确定4个等级,具体划分如表4所示。

(5) 农民人均纯收入

农民人均纯收入作为评价指标之一,反映社会经济在农业生态建设下的发展情况,因北京市人均

表4 北京市农业节水灌溉率等级划分

Tab.4 Grade division of agricultural water-saving irrigation ratio in Beijing

分区等级	I	II	III	IV
分区名称	较差	中等偏下	中等偏上	较高
节水灌溉面积占比/%	≤65	65~75	75~90	>90

收入较高,农民收益与其他地区相比较,基本脱离贫困标准。因此,根据《北京市统计年鉴(2015)》^[23]中农民收入情况,分为收入较低、中等偏下、中等偏上以及收入较好4个等级。再根据各区的农民年平均纯收入数据按照等级划分情况进行分区,具体划分情况如表5所示。

表5 北京市农民人均纯收入等级划分

Tab.5 Grade division of peasant per capita income in Beijing

分区等级	I	II	III	IV
分区名称	较低	中等偏下	中等偏上	较高
农民人均收入/(元·a ⁻¹)	≤16 500	16 500~17 000	17 000~18 000	>18 000

1.3 各指标权重分配与分级赋值

1.3.1 层次分析法(AHP)权重计算方法

层次分析法中,判断矩阵表示本层各个影响因素在上一层影响程度下的影响再分配^[24-28]。SAATY将判断矩阵中各影响因子定义为 A_{ij} ,并在两两比较中用1~9标度方法对影响程度进行量化,具体标度含义如表6所示。

表6 判断矩阵的标度值及其含义

Tab.6 Scale value and definition of judgment matrix

量化值	含义
1	2个因素相比,2个因素同等重要
3	2个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	2个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	2个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	2个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述相邻重要性的中值
倒数	因素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较的判断矩阵元素为 A_{ij} ,则因素 <i>j</i> 与 <i>i</i> 比较的判断矩阵元素为 $A_{ji} = 1/A_{ij}$

判断矩阵中的 A_{ij} 表示相对上一层第*i*因素与第*j*因素的重要性对比,例如*i*与*j*具有同样重要性,则 $A_{ij} = 1, A_{ji} = 1$,若*i*比*j*明显重要,则 $A_{ij} = 5, A_{ji} = 1/5$ 。由此可见判断矩阵为正互反矩阵,再通过求该矩阵的非零特征值并对其对应的特征向量归一化后得到权重和权重向量。

对判断矩阵进行一致性检验,因两两比较中判断结果应该服从一致性标准,若两两比较结果相互之间关联一致性不好或不一致,则说明判断矩阵不可靠。因此判断矩阵需要进行一致性检验,若一致

性较好,则说明权重向量符合思维主观判断。一致性指标计算公式为

$$C_I = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中 C_I ——一致性指标

λ ——最大特征值 n ——因素个数

其中 $C_I = 0$,则说明具有完全一致性; C_I 越接近 0,则说明一致性越好; C_I 的值越大,一致性越差、不一致性越强。但判断中一致性还需要有相应的参考才能说明一致性的好坏,因此引入随机一致性指标 R_I 以及检验系数 C_R 的概念。 R_I 为随机生成的矩阵计算出的一致性指标,一致性指标 C_I 与随机一致性指标 R_I 之比为检验系数 C_R 。其中,随机一致性指标 R_I 与影响因素的个数有关,具体数值如表 7 所示。

表 7 随机一致性指标 R_I

Tab.7 Random index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R_I	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

一般情况下,定义检验系数 $C_R < 0.1$ 时,认为一致性在允许范围内,一致性可以接受, C_R 越小说明一致性越好。

1.3.2 图层权重计算

(1) 构造判断矩阵

根据 1~9 标度法构造判断矩阵,如表 8 所示。从表中可以看出两两因素之间的重要性比对。

表 8 判断矩阵

Tab.8 Judgment matrix

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_1	1	1/2	2	1	5
X_2	2	1	3	2	6
X_3	1/2	1/3	1	1	5
X_4	1	1/2	1	1	5
X_5	1/5	1/6	1/5	1/5	1

(2) 一致性检验

根据表 8 所构造的正互反判断矩阵,可通过 Matlab 编程计算出各因素的权重^[29]。通过计算可得,上述 5 项指标的权重向量为: $W = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = (0.22, 0.38, 0.16, 0.19, 0.05)$ 。最终计算可得,正互反判断矩阵的最大特征值为 6.12。根据式(3)计算得到 $C_I = 0.0259$,由此得到 $C_R = 0.0231$,小于要求的 0.1,通过一致性检验。因此,根据上述判断矩阵得到的 5 项指标的权重符合一致性,满足合理性要求。

1.3.3 各影响因素分级赋值

按照上述权重计算结果进行整理,将 5 项指标

进行编号并进行等级划分和分值赋值。因 AHP 评分结果中,要求权重与指标对应分值乘积的加权综合为最终评价结果。因此对指标体系中提到的指标等级划分进行赋值。为保证数据分值的统一以及合理性,赋值应满足均一化,此处参照以往经验采取分级分值总和为 100 的标准。

根据指标等级划分的影响程度,来评判对应分值的选取,影响程度越高分值越高,并且满足赋值合理性要求。各项指标的权重和等级分值结果如表 9 所示。

表 9 各指标权重及其等级赋值

Tab.9 Weight and assignment of each index

序号	指标	权重	指标等级划分	分值
1	干燥度指数	0.22	$1.5 < X_1 \leq 2.1$	15
			$2.1 < X_1 \leq 2.7$	20
			$2.7 < X_1 \leq 3.3$	27
			$3.3 < X_1 \leq 4.0$	38
2	地下水超采	0.38	严重超采区	9
			一般超采区	21
			弱超采区	33
			基本平衡区、补给区	37
			砂岩	10
3	土壤类型	0.16	砂质土	20
			轻壤土	30
			中、粘壤土	40
			$X_4 \leq 65\%$	13
4	节水灌溉率	0.19	$65\% < X_4 \leq 75\%$	22
			$75\% < X_4 \leq 90\%$	29
			$X_4 > 90\%$	36
			$X_5 \leq 16500 \text{ 元/a}$	19
5	农民人均收入	0.05	$16500 \text{ 元/a} < X_5 \leq 17000 \text{ 元/a}$	22
			$17000 \text{ 元/a} < X_5 \leq 18000 \text{ 元/a}$	27
			$18000 \text{ 元/a} < X_5 \leq 18000 \text{ 元/a}$	27
			$X_5 > 18000 \text{ 元/a}$	32

1.4 分区划定方法

利用 ArcGIS 中 ArcMap 的 ArcTool 中的叠加分析功能将图层按算出的权重叠加。对分区重分类并相应赋值,再将上述图层转化为栅格,网格化的 5 个指标图层按上述计算出的权重分配进行加权总和叠加图层,得到最终带有相应分值的图层。各个单元内分别将各影响因素的分值和权重相乘并求和,得到最终的评分结果,计算公式为

$$\text{Con}V_{i,j} = \sum_{k=1}^5 p_k V_{i,j,k} \quad (4)$$

式中 $\text{Con}V_{i,j}$ ——单元格叠加后的综合评分

$V_{i,j,k}$ ——第 k 层(i,j)单元分值

p_k ——第 k 层权重

2 结果与分析

因北京市城区及石景山区已退出农业种植,本研究在剔除北京市城区及石景山区后,采用层析分析法与 ArcGIS 软件叠加功能相结合,将北京市划分为农业节水优先发展区、农业节水适宜发展区、农业节水鼓励发展区 3 个分区,分区结果如图 4 所示。

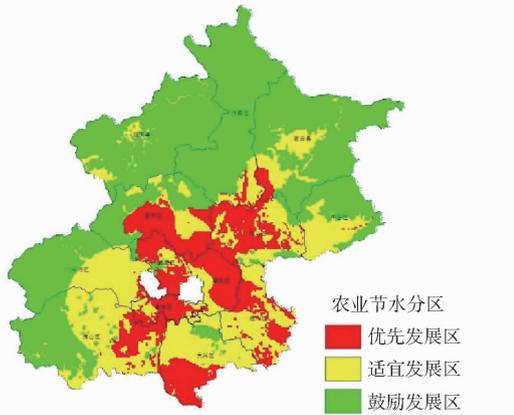


图 4 北京市农业节水分区

Fig. 4 Water-saving zoning in Beijing

2.1 农业节水优先发展区

由图 4 可以看出,农业节水优先发展区主要集中在朝阳、海淀、昌平、顺义等平原区,可以通过调整种植结构,间接促进农业节水,因该区大部分区域位于地下水严重超采区范围内,在严重超采区范围内,应逐步有序退出小麦等高耗水作物种植,严重超采区范围外的区域,可以重点推广农艺节水措施,以农田覆盖技术、抗旱作物品种为重点技术在区内进行推广,以便达到农业节水目的。工程节水方面,区域内节水灌溉率相对较低,该区应加快改善灌溉工程条件、推广高效节水灌溉工程,同时也是政府优先考虑的节水灌溉工程投资区域。

2.2 农业节水适宜发展区

农业节水适宜发展区主要集中在通州、大兴、房山、门头沟等区(图 4),大部分地区位于地下水一般超采区范围内,该区地下水开采程度基本饱和,区域内缺水程度相对较高,从农艺节水方面考虑,该地区适宜推广秸秆还田、免耕覆盖、蓄水保墒技术,将粮田秸秆、果树枝条、废弃菜叶等有机质粉碎还田,改良土壤结构,提高蓄水保墒能力,减少灌溉用水;实施土地平整,适当培高田埂,推进沟路林渠综合治理,增加农田集雨保墒能力,充分利用雨洪水资源;

推广抗旱节水新品种,因地制宜应用化控节水技术,减少作物耗水量。工程节水方面,区域内节水灌溉率及人均收入均处于中间水平,该区应加大政府投资力度,推动高效节水灌溉工程建设,同时应健全完善高效节水灌溉工程管护制度,确保已建灌溉设施的良好运行,正常发挥工程效益。

2.3 农业节水鼓励发展区

农业节水鼓励发展区主要集中在延庆、怀柔、密云、平谷等山区(图 4),大部分地区位于地下水基本平衡区及补给区范围内,缺水程度相对较低,属于生态涵养区,该区可推广抗旱节水新品种、覆盖保墒、水肥一体化、化控节水等农艺节水措施,同时鼓励发展高效节水灌溉工程,加大政府投资建设,实现工程节水。

3 建议

结合北京市农业节水分区结果,提出了分区的节水对策措施与建议。

(1)调整农业种植结构,严重超采区范围内,逐步退出小麦等高耗水作物种植,采用宜林则林、宜草则草、宜果则果、宜休耕则休耕的方式恢复生态涵养功能。

(2)建立灌溉管材及设备质量控制机制,健全完善高效节水灌溉工程管护制度,确保已建及将建灌溉设施的良好运行,发挥正常的工程效益。

(3)加大政府投资力度,推广喷灌、微灌等高效节水灌溉工程,实现工程节水。

(4)推广抗旱节水新品种、覆盖保墒、水肥一体化、化控节水等农艺节水措施。

4 结束语

在总结国内外学者农业节水分区先进经验的基础上,从北京市农业生态节水发展实际情况出发,充分考虑自然条件、水资源状况、工程管理和社会经济状况等,构建了涵盖干燥度、地下水超采、土壤类型、节水灌溉率、农民人均收入在内的北京市农业节水分区指标体系,界定各指标的分级标准,划定相应分区,采用层次分析法与 ArcGIS 叠加分析功能相结合,将北京市划分为农业节水优先发展区、农业节水适宜发展区、农业节水鼓励发展区 3 个分区。结合北京市农业节水分区结果,提出了分区的节水对策措施与建议,可对北京市农业节水工程建设、种植结构调整等提供一定的支撑。

参 考 文 献

- 黄修桥,李英能.华北地区节水型农业分区和发展预测[J].灌溉排水学报,1995,14(3):1-8.
HUANG Xiuhao, LI Yingneng. Water-saving agriculture in North China: area division and development prediction[J]. Irrigation and Drainage, 1995, 14(3): 1-8. (in Chinese)
- 吴乐民,温演望.模糊聚类分析在旱作农业分区上的应用[J].华南农业大学学报,1991,12(4):37-44.

- WU Leming, WEN Yanwang. The application of fuzzy cluster analysis to dryland farming partition [J]. Journal South China Agricultural University, 1991, 12(4): 37-44. (in Chinese)
- 3 王燕. 安徽省节水农业分区初步研究[J]. 中国农村水利水电, 2001(7): 13-15.
- WANG Yan. Primary research on dividing areas of water saving agriculture in Anhui province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2001(7): 13-15. (in Chinese)
- 4 杨路华, 王文元, 韩振中, 等. 宁波市农业节水区划中模糊聚类分析与应用[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(5): 52-55.
- YANG Luhua, WANG Wenyuan, HAN Zhenzhong, et al. Application of fuzzy cluster to agricultural water saving zoning [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(5): 52-55. (in Chinese)
- 5 韩振中, 杨军, 王留运, 等. 宁波市农业节水区划与分区节水技术对策[J]. 节水灌溉, 2003(6): 39-41.
- 6 商文华, 郭维东, 黄毅, 等. 阜新县节水农业分区研究[J]. 节水灌溉, 2006(3): 13-15, 20.
- SHANG Aihua, GUO Weidong, HUANG Yi, et al. Study on area division of water saving agriculture in Fuxin county of Liaoning province [J]. Water Saving Irrigation, 2006(3): 13-15, 20. (in Chinese)
- 7 刘玉凤, 黄介生, 伍靖伟. 基于最大树法的华北地区节水型农业分区[J]. 中国农村水利水电, 2013(12): 80-84.
- LIU Yufeng, HUANG Jiessheng, Wu Jingwei. Area division for water-saving agriculture in North China of maximal tree method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(12): 80-84. (in Chinese)
- 8 马立辉, 赵玲, 张会芹, 等. 模糊-动态聚类法在河北省农业节水区划中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(1): 42-44.
- MA Lihui, ZHAO Ling, ZHANG Huiqin, et al. Application of fuzzy-dynamic clustering in division of agricultural water saving zones in Hebei province [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2006, 4(1): 42-44. (in Chinese)
- 9 何英, 郭玉川, 姜卉芳. 基于模糊-动态聚类法的新疆节水区划探讨[J]. 节水灌溉, 2009(2): 5-7, 10.
- HE Ying, GUO Yuchuan, JIANG Huifang. Discussion on water-saving district programming of Xinjiang autonomous region based on fuzzy-dynamic clustering method [J]. Water Saving Irrigation, 2009(2): 5-7, 10. (in Chinese)
- 10 李硕, 许萌芽. 主成分聚类分析法在宁夏水文分区中的应用[J]. 水文, 2002, 22(2): 44-46.
- 11 尹剑, 王会肖, 李鹏, 等. 保定市农业节水分区[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 127-132.
- YIN Jian, WANG Huixiao, LI Peng, et al. Study on agricultural water-saving regionalization in Baoding [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 127-132. (in Chinese)
- 12 尹剑, 王会肖, 王艳阳, 等. 关中地区农业节水分区研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1173-1179.
- YIN Jian, WANG Huixiao, WANG Yanyang, et al. Agricultural water-saving regionalization in Guanzhong area [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1173-1179. (in Chinese)
- 13 褚琳琳. 江苏省节水农业分区及发展模式[J]. 节水灌溉, 2014(11): 91-95.
- CHU Linlin. District division and development model of water-saving agriculture in Jiangsu province [J]. Water Saving Irrigation, 2014(11): 91-95. (in Chinese)
- 14 吴景社, 康绍忠, 王景雷, 等. 基于主成分分析和模糊聚类方法的全国节水灌溉分区研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 64-68.
- WU Jingshe, KANG Shaozhong, WANG Jinglei, et al. Zoning of water-saving irrigation in China using principal components analysis and fuzzy-C-means [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 64-68. (in Chinese)
- 15 刘玉邦, 梁川. 基于主成分和模糊 C-均值聚类算法的农业水资源高效利用综合分区[J]. 水文, 2011, 31(5): 57-63.
- LIU Yubang, LIANG Chuan. Zoning for effective utilization of agricultural water resources based on principal component analysis and fuzzy C-means clustering algorithm [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(5): 57-63. (in Chinese)
- 16 钱颂迪. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 461-466.
- 17 汪应洛, 陶谦钦. 运筹学与系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 249-256.
- 18 程理民, 吴江, 张玉林, 等. 运筹学模型与方法教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 246-256.
- 19 陈建伟, 张煜星. 湿润指数与干燥度关系的探讨[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 79-82.
- CHEN Jianwei, ZHANG Yuxing. Discussion on relation between humidity index and aridity degree [J]. Journal of Desert Research, 1995, 15(1): 79-82. (in Chinese)
- 20 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861.
- MENG Meng, NI Jian, ZHANG Zhiguo. Aridity index and its applications in geo-ecological study [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(6): 853-861. (in Chinese)
- 21 SL 286—2003 地下水超采区评价导则[S]. 2003.
- 22 北京市水务局. 北京市水务统计年鉴(2014) [M]. 北京: 北京市水务局, 2014.
- 23 北京市统计局. 北京市统计年鉴(2015) [M]. 北京: 北京市统计局, 2015.
- 24 许树柏. 实用决策方法——层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998.
- 25 张志政, 王毅, 苏静. 利用层次分析法优化选择节水灌溉方式[J]. 农机化研究, 2008(4): 55-58.
- ZHANG Zhizheng, WANG Yi, SU Jing. Optimal choice of water saving irrigation mode by AHP [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(4): 55-58. (in Chinese)
- 26 翟治芬, 王兰英, 孙敏章, 等. 基于 AHP 与 Rough Set 的农业节水技术综合评价[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 931-941.
- ZHAI Zhifen, WANG Lanying, SUN Minzhang, et al. Comprehensive evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP and Rough Set method [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2012, 32(3): 931-941. (in Chinese)
- 27 陈成. 基于层次分析法的农业节水灌溉适宜技术的研究——以四川农业大学现代农业研发基地为例[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- CHEN Cheng. Based on AHP of agricultural water-saving irrigation technique research—modern base in Sichuan agricultural university as an example [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 28 霍星, 史海滨, 杨松益. 基于层次分析-蚁群算法的内蒙古大型灌区节水改造综合评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 132-140.
- HUO Xing, SHI Haibin, YANG Songyi. Comprehensive assessment on water-saving renovation of large-scale irrigation districts in Inner Mongolia based on hierarchical analysis ant colony algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 132-140. (in Chinese)
- 29 焦树锋. AHP 法中平均随机一致性指标的算法及 MATLAB 实现[J]. 太原师范学院学报: 自然科学版, 2006, 5(4): 45-47.
- JIAO Shufeng. The algorithm of mean random consistency index in AHP and its implementation [J]. Journal of Taiyuan Normal University: Natural Science Edition, 2006, 5(4): 45-47. (in Chinese)