

关中地区干旱等级模糊综合评价

王海科, 徐盼盼, 钱会

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于关中地区5个市区2013年全年的水文气象数据,选取了降水、径流、水库蓄水及地下水4大指标,采用以层次分析法来确定权重的模糊综合评价法,对关中5个市区2013年的干旱情况进行等级评价。评价结果表明:采用单一指标来进行干旱等级评价,评价结果会有所差异,而模糊综合评价法很好地解决了单一指标评价的不全面性和差异性;关中5市中,宝鸡市综合评价结果为无旱,西安、咸阳、渭南及铜川评价结果均为轻度干旱,主要原因是2013年宝鸡市降雨量比其他4市丰富;2013年关中地区全年整体干旱程度为轻度干旱至无旱,评价结果与实际情况基本一致,表明该评价方法在关中地区干旱等级评价中具有一定的可行性。

关键词: 干旱评价; 模糊综合评价法; 干旱指标; 关中地区

中图分类号: S423 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)03-0043-05

Fuzzy comprehensive evaluation of drought degree in Guanzhong area

WANG Haike, XU Panpan, QIAN Hui

(College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based the hydrological and meteorological data of 2013, the paper selected four indicators such as precipitation, runoff, reservoir storage and groundwater, and used fuzzy comprehensive evaluation method its weight is determined by AHP to evaluate the drought situation for five city of Guanzhong area in 2013. The evaluation result indicated that using single indicator to evaluate drought degree, the evaluation results will have difference. and the fuzzy comprehensive evaluation method perfectly solved the incomplete problem of single indicator evaluation; in five cities of Guanzhong area, the results of comprehensive evaluation on Baoji is no drought, but the assessment results of Xian, Xianyang, Weinan and Tongchuang are mild drought, the main reason is that annual rainfall in Baoji City in 2013 is more than that in other four cities; the degree of drought in Guanzhong area in 2013 is mild drought and no drought. The evaluation result is consistent with the actual situation, which indicated that the evaluation method has certain feasibility in the evaluation of drought degree of Guanzhong area.

Key words: drought assessment; fuzzy comprehensive evaluation; drought index; Guanzhong area

1 研究背景

随着国民经济的快速发展,人类社会对水资源的需求急剧增加,水资源供需矛盾日益尖锐,缺水问题日益突出,干旱对我国的威胁不断加剧。根据相关测算,1990-2005年中国因干旱平均每年损失粮食超过 2600×10^4 t,相当于 6000×10^4 人一年的粮食需求。近年来,随着全球气候的变化,全球降雨可利用水资源量发生了很大的变化,极端事件时有发

生,给粮食安全带来了挑战^[1-3]。有研究表明^[4],近年来,中国77.4%的省份旱灾呈现增加趋势,其中长江以北的省份旱灾增加趋势明显。因此,开展干旱研究,进行干旱评价已刻不容缓。

目前国内外不同学者对干旱的认识有着不同理解,不同的部门、行业基于不同的角度,从实际工作的需求出发去认识干旱,提出了不同的干旱定义。通过查阅相关文献[5]和资料可以看出,目前干旱定义可以大致分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和

收稿日期:2015-10-29; 修回日期:2016-03-12

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201301084)

作者简介:王海科(1993-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事水文地质方面的研究。

通讯作者:钱会(1963-),男,陕西咸阳人,博士,教授,博导,主要从事水文地质方面的研究。

社会经济干旱4种类型。气象干旱主要研究的是天气的干、湿程度,通常用某时段的降水值来衡量。气象干旱的主要评价指标有:帕尔默干旱指标(PD-SI)、连续无雨日数、降雨距平百分率、标准差指数、湿润度和干燥度指标、Bhalme - Moolry 干旱指标、Z 指标^[6]等。水文干旱是指河川径流量和蓄水量持续性地较常年偏少,难以满足需水需求的一种水文现象。水文干旱的评价指标主要有:水库蓄水量距平百分率、河道来水量距平百分率^[5]。农业干旱是指农作物正常生长所需水量与所供水量不平衡的现象,主要与前期土壤湿度、作物生长期有效降水量以及作物需水量有关。目前评价农业干旱常用的指标有:土壤湿度、降水量指标^[7]、土壤含水量指标^[8]、作物受灾面积百分比、供需水比例指标^[9]、温度指标、旱涝指数指标等。社会经济干旱指的是自然系统与人类社会系统中水资源供需不平衡造成的异常水分短缺的现象,目前评价社会经济干旱比较常用的是 Ohlsson^[10]提出的 SWSI 指数(Social Water Scarcity Index)。

对于干旱评价的深入研究大概可以追溯到20世纪60年代。1965年,Palmer提出了帕尔默干旱指数(PDSI),PDSI是建立在桑斯威特法计算的基础上,包含了降水量、蒸散量、径流量和土壤有效水分储存量在内的水分平衡模型,该指标目前在国内外广泛应用于旱情比较、旱情时空分析、干旱评估等方面。1968年Palmer基于PDSI指数提出了作物水分指数CMI,用来评价农作物的干旱情况,但由于PDSI指标在建模时取的数据站点有限,桑斯威特法计算时仅考虑了温度以及各个地区气候影响因素的不相同造成了干旱分析存在很大的误差^[11]。1980年,Bahlme与Mooley提出了用BMDI指标进行干旱程度的划分,由于BMDI指标仅考虑了降雨量指标,可视作Palmer指标的简化形式^[6]。Z指标也是广泛使用的指标之一,它假定降雨量符合P-III型分布,再次基础上进行干旱评价。由于Z指标只是在降雨量的概率分布上用P型分布代替了正态分布,没有考虑降雨量在年内分配不均匀的影响,所以在干旱评价时也有一定的局限性。随着对干旱的进一步深入研究,学者们也逐渐提出了越来越多的综合干旱评价指数,借以来更好地进行干旱研究。2004年建议的ADI(Aggregated Drought Index)指数^[12],将不同的干旱类型的物理形式相结合,利用正态分布的方法来进行干旱评价与预测。还有学者以降水、气温为基础,结合径流变化趋势,建立了一种包含气

象和水文干旱的干旱计算模型,但计算中的权重校准使其应用存在一定的局限性。2008年,由Shukla等^[13]提出了标准化径流数(Standardized Runoff Index, SRI)和水流干旱指数(Streamflow Drought Index, SDI),该指数能较好地反映由于季节变化引起的滞后而导致干旱发生时间变化的问题,但却无法识别出干旱频率发生的地区。2009年张波等^[14]以降雨量、径流量及蒸发量为主构造的综合干旱评价指标,借此对淮河流域干旱进行了等级评价,与实际情况有较好的符合度但该评价方法有很大的地区局限性。Wen等^[15]在2011年提出了SFI指数(Standardized Flow Index),Vicente - Serrano等^[16]于2012年提出的SSI指数(Standardized Streamflow Index)这些都是以径流资料为基础,采用不同的频率分布来分析研究区域干旱状况。

上述指标分别从不同方面上分析干旱形成的影响因素,以此来评价干旱等级,由于干旱发生往往取决于多方面的因素,仅仅利用单一指标来评价一个地区的干旱程度是很不全面的,因此,许多学者运用模糊综合评价法将单一指标综合起来对干旱进行了分析且取得了不错的评价结果。目前干旱模糊综合评价法在国内干旱评价中已经有了一定的应用,雷江群等^[17]采用基于对立统一与质量互变定律的可变模糊综合评价法对渭河流域干旱状态进行了评价,但其在不同地区、不同年份采用固定的权重,这会对分析结果造成一定的误差;罗彦丽等^[18]采用基于信息熵、层次分析法及最小熵原理来确定综合权重的模糊综合评价法对广西41年干旱情况进行了评价与预测且取得了较高的精度,但为了提高精度需要对数据进行7次方根变换,计算过程复杂繁琐。本文在前人研究的基础上,考虑到各种因素对关中干旱形成的影响,选取了具有代表性的几个指标,采用基于层次分析法分别确定不同地区的权重,然后采用模糊综合评价法将各因素综合考虑,建立干旱等级评价体系对关中区域干旱进行综合评价。该方法计算方法简单,避免了权重确定的随机性且在不同地区分别计算了其权重,保证不同地区的评价精度。

2 模糊综合评价法在干旱评价中的应用

模糊综合评价法是基于模糊数学的综合评价方法。该综合评价法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物做出一个总体的评价。它是由美国

著名控制论专家、模糊数学的创始人查德(L. A. Zadeh)首先提出来的,它具有结果清晰,系统性强的特点,能较好的解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决。该方法自问世以来,在经济系统、工程系统、农业系统等诸多方面得到了广泛而颇有成效的应用。

模糊综合评价法的基本原理是:首先确定被评价对象的因素集和评价集;再分别确定各个因素的权重及它们的隶属度函数,获得模糊评判矩阵;最后把模糊评判矩阵与因素的权向量进行模糊运算并进行归一化,然后运用一定的算法则得到模糊综合评价结果。在干旱模糊综合评价中的具体步骤如下:

(1) 确定因素(指标)集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 即 n 个干旱评价指标。

(2) 确定评价等级集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 即 m 个干旱等级, 每个等级可对应一个评价子集。

(3) 进行单因素模糊评判, 即对每一个区域中的各个单项指标分别进行模糊评价, 得到隶属度向量 $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$, 形成隶属度矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

矩阵 R 中第 i 行第 j 列中元素 r_{ij} 表示某个被评事物从指标 u_i 来看对 v_j 等级模糊子集的隶属度。隶属度可由隶属函数求得, 在干旱模糊评价中常用的隶属函数如下:

$$U_{v1} = \begin{cases} 1 & x_2 < x < x_1 \\ \frac{x - x_3}{x_2 - x_3} & x_3 < x < x_2 \\ 0 & x < x_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{v2} = \begin{cases} \frac{x_1 - x}{x_1 - x_2} & x_2 < x < x_1 \\ 1 & x_3 < x < x_2 \\ \frac{x - x_4}{x_3 - x_4} & x_4 < x < x_3 \\ 0 & x < x_4 \end{cases} \quad (3)$$

$$U_{v2} = \begin{cases} 0 & x_2 < x < x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_3} & x_3 < x < x_2 \\ 1 & x_4 < x < x_3 \\ \frac{x}{x_4} & x < x_4 \end{cases} \quad (4)$$

$$U_{v1} = \begin{cases} 0 & x_3 < x < x_1 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_4} & x_4 < x < x_3 \\ 1 & x < x_4 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x 为各评价因子的值; x_1, x_2, x_3, x_4 对应的干旱等级为无旱、轻度干旱、中度干旱、重度干旱的临界值。

(4) 确定评价因素的模糊权向量 B

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_i) \quad (6)$$

式中: $b_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为各评价指标隶属度的权重系数。在模糊综合评价中, 权向量对最终的评价结果会产生很大的影响, 不同的权重有时会得到不同的结论。目前确定权重的方法主要有: 专家估计法、德尔菲(Delphi)法、特征值法、加权平均值法、层次分析法等, 本文本次采用层析分析法来确定各评价指标的权重系数。

层次分析法是美国运筹学家 Saaty 教授于 20 世纪 70 年代首次提出来的^[19], 该方法很好地以定性和定量相结合的方法解决了多目标的复杂问题。该方法根据问题的性质和要达到的目标将问题分解为不同的组成因素, 并按照因素之间的相互关联将其分成一个不同层次的组合, 用决策者的经验判断衡量低层次之间的相对重要程度, 并合理的给出各个目标之间的相对权数, 从而可以确定高层次的相对权重。该方法可以解决以往在模糊评价法中权重确定的主观随意性, 使得评价结果更加具有可信度。

(5) 计算综合评判(综合隶属度)向量 C :

在干旱综合评价中一般采用乘积有界和算子将权重隶属度矩阵进行处理。

首先将隶属度矩阵与权重向量相乘得到权重隶属度矩阵

$$R' = R \circ B = \begin{pmatrix} r_{11}b_1 & r_{12}b_1 & \dots & r_{1m}b_1 \\ r_{21}b_2 & r_{22}b_2 & \dots & r_{2m}b_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1}b_n & r_{n2}b_n & \dots & r_{nm}b_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

将 R' 中的各列相加得到 $C = (C_1, C_2, \dots, C_m)$, C 反映了所有影响因素对干旱等级的综合影响, 其中

$$C_j = \min \left\{ \sum_{i=1}^n r_{ij}b_j, 1 \right\}, (j = 1, 2, \dots, m)$$

(6) 对模糊综合评价的结果 C 进行比较分析, 根据一定的原则, 如最大隶属度原则作出评判或计算综合评判值得出综合评价结果值, 然后与干旱评价等级标准对比可得出干旱综合评价等级。

3 研究区概况

关中地区位于陕西省中部,西起宝鸡,东至潼关,主要有西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南5个市区(图1所示),是陕西省经济最发达的地区,也是全省的政治经济文化中心。关中地区处于温暖带半湿润与半干旱气候的过渡地带,属大陆性季风气候。多年平均降雨量为500~700 mm,多年平均蒸发量1 000~1 200 mm,干旱指数1.0~1.7。黄河最大的支流渭河贯穿其间,其它较大的河流主要有泾河、洛河、千河等。关中地区虽然土地肥沃,多年来却一直深受干旱影响,因受季风性气候影响,水资源短缺且分布不均,干旱的发生发展、造成影响的区域性明显,干旱成为关中地区的主要自然灾害^[20]。因此对于干旱等级的评价就显得尤为重要,依照正确可靠的评价可以做出最适当的应对措施,进而将干旱造成的危害降到最低。

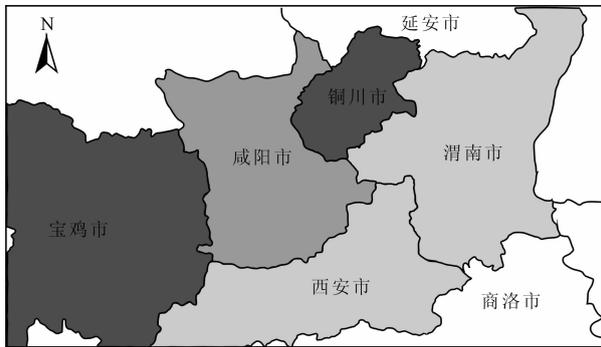


图1 研究区各市分布图

4 评价指标的选择及干旱等级划分

本文从干旱灾害形成的水文气象和水资源条件出发,考虑人为因素的影响,结合相关资料^[21]及现有数据,选取了4种评价指标。

(1)降雨指标:降雨指标选择降雨距平百分率 I 来表示:

$$I = \frac{R - R'}{R'} \quad (8)$$

式中: R 为评价时段降雨,mm; R' 为该地区多年平均降雨量,mm。根据该指标将干旱划分为4个干旱等级,具体见表1所示。

(2)径流指标:径流指标采用评价时段径流量与多年平均年径流量的比较来表示:

$$q = \frac{Q}{Q'} \quad (9)$$

式中: Q 为评价时段径流量, m^3/s ; Q' 为多年评价径

流量, m^3/s 。根据相关文献经验该指标干旱等级划分情况见表1。

(3)水库蓄水指标:水库蓄水指标采用水库蓄水率 β 来表示:

$$\beta = \frac{V}{V'} \quad (10)$$

式中: V 为评价时段水库蓄水量; V' 为水库兴利库容。该评价指标的干旱等级划分详见表1。

(4)地下水指标:地下水指标选择地下水埋深下降值来表示,该指标等级划分标准见表1。

用指标评价干旱程度时,为了取得统一的标准需要将各个指标划分为统一的等级模糊子集,即干旱等级。根据《气象干旱等级》及《旱情等级标准》,参考相关文献^[20~22]将干旱等级划分为无旱、轻度干旱、中度干旱、重度干旱4个等级。各指标各等级的划分情况见表1。

表1 干旱等级划分指标

干旱等级	降雨指标	径流指标	水库蓄水指标	地下水指标
无旱	0.15 ~ -0.20	0.9 ~ 1.1	0.7 ~ 1.0	0 ~ 0.1
轻度干旱	-0.20 ~ -0.30	0.7 ~ 0.9	0.5 ~ 0.7	0.1 ~ 0.4
中度干旱	-0.30 ~ -0.50	0.6 ~ 0.7	0.2 ~ 0.5	0.4 ~ 1.0
重度干旱	< -0.50	< 0.6	< 0.2	> 1.0

5 结果与讨论

本文以关中5市为例(西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市),以2013年全年的数据资料对关中5市干旱进行评价。

以西安市为例进行计算说明,计算得出西安市2013年隶属度矩阵 A :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0.87 & 1 & 0.13 \\ 0.45 & 1 & 0.55 & 0 \\ 1 & 0.85 & 0 & 0 \\ 1 & 0.4 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

采用层次分析法得出4个干旱指标所对应的权重为 $B = (0.5166, 0.1682, 0.2382, 0.077)$,从而可以得出权重隶属矩阵,采用乘积有界和模糊合成算子可以得到综合隶属度向量 $C = (0.391, 0.851, 0.609, 0.067)$;采用最大隶属度法可知西安市2013年干旱综合评价指数为0.851,为轻度干旱。

参照上述方法可以求出关中地区其他市区的干旱综合评价指数,结果见表2。

表2 2013年关中地区5市干旱等级评价结果

城市	降雨 指标	径流 指标	水库蓄 水指标	地下水 指标	综合评 价指标
西安	中度干旱	轻度干旱	无旱	无旱	轻度干旱
铜川	无旱	轻度干旱	中度干旱	无旱	轻度干旱
宝鸡	无旱	无旱	轻度干旱	无旱	无旱
咸阳	轻度干旱	轻度干旱	中度干旱	无旱	轻度干旱
渭南	中度干旱	轻度干旱	轻度干旱	无旱	轻度干旱

从表2中可以看出不同的评价指标所得出的干旱等级是有一定差异的,如以西安市为例,降雨指标、径流指标、地下水指标的评价结果分别为中度干旱、轻度干旱和无旱。从单一指标的评价结果来看,采用降雨指标评价的结果偏向干旱,西安、咸阳、渭南三市都为中度干旱,其原因为关中地区的多年平均降雨量低于全国平均降雨量,2013年的降雨量虽然相对于其他年份已有所提升,但总量较全国而言还是偏低;采用径流指标评价结果与综合评价结果一致,近几年关中地区解决缺水问题主要是跨流域调水^[23],且加强了地表径流的管理,因此干旱情况与径流有着较大的相关性;从水库蓄水指标来看,铜川与咸阳属中度干旱,表明2013年铜川咸阳两市主要是依靠水库蓄水量来应对的2013年的缺水问题;地下水指标评价结果都为无旱,说明目前关中五市对于地下水开采有着较强的管理,使得地下水水位保持相对稳定。不同指标的评价结果有差异说明在干旱评价的过程中不能仅仅依据一种指标来进行等级判断。综合评价结果中,除了宝鸡市为无旱,其余4市皆为轻度干旱,这与2013年宝鸡的年降雨量多于其他4市有着密切的关系,并且地表径流也要多于其他4市,因此宝鸡地区较其他地区湿润。根据陕西省统计年鉴资料^[24]记录,2013年陕西省全省旱灾属于轻度偏中程度,综合评价结果表明关中5市干旱评价结果基本上为轻度干旱,与实际结果基本一致,说明干旱模糊综合评价法在关中地区是可以适用的,评价结果有着较高的可信度。

6 结论

(1)旱情评价时,单一指标或综合指标都与干旱等级之间有着复杂的关系,使用不同的评价指标得到的结果往往有所不同,将模糊综合评价法应用到干旱等级评价中,有效地解决了各评价指标评价结果的不统一性。将层次分析法应用到干旱模糊综

合评价中,有效地解决了模糊评价法中权重确定的主观随意性,使评价结果更加客观准确。

(2)干旱模糊综合评价法评价结果表明,2013年关中5市干旱等级与地表径流有着较大的一致性,关中5市近年来对其水资源有较强的管理,主要依靠跨流域调水来解决关中地区的干旱问题,由于2013年关中地区地表径流指标评价结果显示基本为轻度干旱,所以综合评价结果也是轻度干旱。

(3)应用干旱模糊综合评价法对关中地区5市2013年旱情做了评价,宝鸡市2013年评价结果为无旱,西安、咸阳、渭南及铜川评价结果为轻度干旱,评价结果表明2013年全年关中地区干旱等级基本上为轻度干旱,评价结果与资料记载一致,客观准确的反映了实际情况,表明模糊综合评价法在干旱等级评价中有一定的可信度,且可以应用到其他地区。

参考文献:

- [1] 吴健华,李培月,钱会. 西安市气象要素变化特征及可利用降雨量预测模型研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013,11(1):50-54.
- [2] 钱会,李培月,王涛. 基于滑动平均-加权马尔科夫链的宁夏石嘴山市年降雨量预测[J]. 华北水利水电学院学报,2010,31(1):6-9.
- [3] 钱会,李培月,吴健华. 银川市近49a来降雨变化特征分析[J]. 华北水利水电学院学报,2010,31(2):1-5.
- [4] 王静爱,孙恒,徐伟,等. 近50年中国旱灾的时空变化[J]. 自然灾害学报,2002,11(2):1-6.
- [5] 王艳玲. 区域干旱模糊综合评价研究[D]. 济南:山东大学,2007:1-4.
- [6] 王劲松,冯建英. 甘肃省河西地区径流量干旱指数初探[J]. 气象,2000,26(6):3-7.
- [7] 刘永忠,李齐霞,孙万荣. 气候干旱与作物干旱指标体系[J]. 山西农业科学,2005,33(3):50-53.
- [8] 袁文平,周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展,2004,19(6):982-990.
- [9] 冯平,李绍飞,王仲珏. 干旱识别与分析指标综述[J]. 中国农村水利水电,2002(7):13-15.
- [10] Ohlsson L. Water conflict and social resource scarcity[J]. Physics and Chemistry of The Earth (Part B Hydrology Oceans & Atmosphere),2000,25(3):213-220.
- [11] 曹永强,张亭亭,王学风,等. 黄河流域帕尔默干旱指数的修正及应用[J]. 资源科学,2014,36(9):1810-1815.
- [12] Liu Sun, Mitchell S W, Davidson A. Multiple drought indices for agricultural drought risk assessment on the Canadian prairies [J]. International Journal of Climatology,2012,32(11):1628-1639.

- 点源负荷估算输出系数法的研究和应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 159-162.
- [14] 张 姝, 周 莹, 李铁庆. 辽河流域面源污染负荷定量试验研究[J]. 辽宁城乡环境科技, 2006, 26(4): 29-30.
- [15] 王金龙, 李法云, 吕纯剑, 等. 辽宁北部典型流域水生态功能三级分区与水生态服务功能评价[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(4): 105-112.
- [16] 王洪营, 贺守东. 凡河水质现状及变化趋势分析[J]. 现代农业, 2008(8): 60-60.
- [17] 李 丽, 裴 岚. 辽河流域凡河段水质现状及污染因素分析[J]. 现代农业, 2009(4): 67-68.
- [18] 吕兴娜. 铁岭市凡河水污染现状及治理对策研究[J]. 黑龙江环境通报, 2011, 35(1): 73-75.
- [19] 方大勇. 影响凡河水质的主要因素及控制对策[J]. 环境保护与循环经济, 2009, 29(7): 42-44.
- [20] 铁岭县统计局. 铁岭县乡镇统计报表[R]. 铁岭: 铁岭县统计局, 2010.
- [21] 铁岭市人民政府. 2007年铁岭市国民经济和社会发展统计公报[R]. 铁岭: 铁岭市人民政府, 2008.
- [22] 铁岭市人民政府. 2008年铁岭市国民经济和社会发展统计公报[R]. 铁岭: 铁岭市人民政府, 2009.
- [23] 铁岭市人民政府. 2009年铁岭市国民经济和社会发展统计公报[R]. 铁岭: 铁岭市人民政府, 2010.
- [24] 数据来源于铁岭市环境保护科学研究院.
- [25] Johns P J, HeathWaite A L. Modeling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments [J]. Hydrology Processes, 1996, 11(3): 269-286.
- [26] Johns P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4/5): 323-349.
- [27] 张洪波, 李 俊, 黎小东, 等. 缺资料地区农村面源污染评估方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(6): 58-66.
- [28] 庞 燕, 项 颂, 储昭升, 等. 基于GIS的洱海农村生活污水及其总氮产排强度空间分析及控制对策[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3344-3352.
- [29] 杨玉洁. 辽宁省农业面源污染压力评估及治理途径研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [30] 国家环境保护总局科技标准司. GB18596-2001, 畜禽养殖业污染物排放标准[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2003.
- [31] 周天墨, 付 强, 诸云强, 等. 中国分省畜禽产污系数优化及污染物构成时空特征分析[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 762-776.
- [32] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R]. 北京: 中国环境规划院, 2003.
- [33] 文 毅. 辽河流域水污染物总量控制管理技术研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.

(上接第47页)

- [13] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. Geophysical research Letters, 2008, 35(2): 226-236.
- [14] 张 波, 陈 润, 张 宇. 旱情评价综合指标研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(1): 21-24.
- [15] Wen L, Rogers K, Ling J. et al. The impacts of river regulation and water diversion on the hydrological droughts characteristics in the Lower Murumbidgee River, Australia [J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(4-5): 382-391.
- [16] Vicente-Serrano S M, Lopez-Moreno J I, Beguerla S, et al. Accurate computation of a stream flow drought index [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(2): 318-332.
- [17] 雷江群, 黄 强, 王义民, 等. 基于可变模糊评价法的渭河流域综合干旱分区研究[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 574-584.
- [18] 罗彦丽, 刘合香, 倪增华. 广西41年干旱灾害的模糊综合评价与预测[J]. 气象研究与应用, 2012, 12, 33(4): 5-9.
- [19] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究. [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2007, 29(1): 153-155.
- [20] 蔡明科. 关中地区水文、气象干旱特征对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 33-37.
- [21] 易知之, 梁忠民, 赵卫民, 等. 模糊综合法在区域干旱评价中的应用[J]. 人民黄河, 2012, 34(6): 68-70.
- [22] 刘晓宁, 贾忠华. 模糊综合评价在关中灌区干旱评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(2): 62-65.
- [23] 张润平. 陕西省抗旱应急水源工程规划思路初探[J]. 陕西水利, 2010(3): 45-47.
- [24] 陕西省统计局, 国家统计局陕西调查总队. 陕西统计年鉴2014 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014: 129.