

典型山区河流水环境承载力研究——以庆元县为例

吴德慧¹, 陈俊², 吴有富¹, 张远孝¹

(1. 丽水市生态环境局庆元分局, 浙江丽水 323800; 2. 浙江寰博环保科技有限公司, 浙江丽水 323000)

摘要 通过实地调查庆元县的水环境现状、河道的水力学特点及其水动力条件, 提出了可行数学模型对主要污染物排放情况进行定量模拟, 通过模型计算得庆元县现状的 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 水环境容量分别是 410.39、13.93、0.45 t/a。通过建立科学的评价指标体系, 从水资源、水生态环境、社会经济 3 个系统中共选取 19 项相关评价指标, 运用模糊综合评价模型从时间维度综合研究庆元县的水环境承载能力, 表明 2014—2019 年水环境承载力基本呈逐年上升趋势。

关键词 山区型河流; 水环境容量; 水环境承载力; 庆元县

中图分类号 X143 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)04-0091-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.04.024



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Water Environment Carrying Capacity of Typical Mountain Rivers—Taking Qingyuan County as an Example

WU De-hui¹, CHEN Jun², WU You-fu¹ et al (1. Qingyuan Branch of Lishui Ecological Environment Bureau, Lishui, Zhejiang 323800; 2. Zhejiang Huanbo Environmental Protection Technology Co., Ltd., Lishui, Zhejiang 323000)

Abstract By field investigation of water environment, hydraulic characteristics and hydrodynamic conditions of rivers in Qingyuan County, a feasible mathematical model to quantitatively simulate the discharge of main pollutants was put forward. The verification of the model calibration of relevant parameters were completed. Through the calculation of the model, the current water environmental capacity of chemical oxygen demand, ammonia nitrogen and total phosphorus in Qingyuan County were 410.39, 13.93 and 0.45 t/a, respectively. 19 relevant evaluation indexes were selected from the three systems of water resources, water ecological environment and social economy in the establishment of a scientific evaluation index system. The fuzzy comprehensive evaluation model was used to study the water environment carrying capacity of Qingyuan County comprehensively from the time dimension. Results showed that the water environment carrying capacity was basically increasing year by year from 2014 to 2019.

Key words Mountainous river; Water environment capacity; Water environment carrying capacity; Qingyuan County

从宏观上来看, 水环境承载力是指在一定的社会、经济和技术条件下, 一定区域(流域)的水系统功能所支撑的社会经济发展和人民生活^[1-3]。为更好实现在保障良好生态环境的同时实现经济社会的协调可持续发展, 对区域水环境承载能力开展科学研究的意义显得更加重大^[4-8]。庆元位于浙江省与福建省的交接处, 是瓯江、闽江、交溪(福安江)三大支流的发源地, 由于其独特的地理位置, 水环境保护工作显得尤为重要。目前, 随着庆元县经济快速发展, 工业产值逐年提升, 工业园区的发展建设越来越快, 县域生态环境压力也与日俱增, 特别是水环境容量已成为制约县域经济社会发展的重要瓶颈。庆元作为全国生态环境第一县, 水环境承载力和容量是区域经济社会可持续发展的重要基础, 开展区域水环境承载力和容量调查评价对庆元县经济的持续发展和生态文明建设具有重要意义。笔者在已有研究成果的基础上, 以水环境承载力理论和实践为支撑, 以一维水质模型法^[9-17]进行水容量研究, 同时以庆元县作为研究区域, 从水资源、水生态环境、社会经济 3 个系统中共选取 19 个综合评价指标, 构建一个包含 3 个层次的庆元县水环境承载力评价指标系统, 并对其中的数据进行归一化处理; 运用模糊综合评价模型^[18-20]从时间维度综合研究庆元县的水环境承载能力情况。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 庆元县位于浙江省西南部(118°50'~119°30'E, 27°25'~27°51'N), 北与龙泉、景宁畲族自治县接壤, 东、

西、南与福建省寿宁、松溪、政和 3 县交界。县城距丽水市 233 km, 距杭州市 532 km。全县南北长 49 km, 东西宽 67 km, 总面积 1 898 km²。境内有瓯江、闽江、交溪三大水系, 拥有左溪、南阳溪、松源溪、安溪、竹口溪、西溪、八炉溪 7 条主要河流, 其中, 左溪、南阳溪为瓯江水系; 松源溪、安溪、竹口溪为闽江水系; 八炉溪、西溪为交溪水系, 汇入交溪入东海。由于地理环境的特殊性和政策指导等因素, 庆元县工业聚集点和人口生活汇聚点主要分布在庆元县西部的松源溪、安溪和竹口溪, 因此此次水容量研究主要涉及西部竹口溪、松源溪和安溪 3 条河流, 水环境承载力研究则是全县范围。

庆元县属亚热带季风气候区, 全年季节变化明显, 以温和、湿润、多雨为主要气候特征。多年平均气温为 19.1 °C, 平均降水量 1 713.4 mm, 平均蒸发量 1 319.1 mm, 全年无霜期 247~193 d。受到季风和地形的影响, 降水的时空分布不均匀。

1.2 数据来源 该研究数据来源于《庆元县环境监测年报》(2010—2020 年)以及 2014—2019 年的《庆元县统计年鉴》《政府工作报告》《庆元县水资源公报》《庆元县环境统计年鉴》《庆元县国民经济和社会发展统计年鉴》、省际断面自动监测站监测数据。

1.3 研究方法 该研究采用文献研究法、实地调查法、定量模拟法、一维水质模型法^[9-17]、指标体系评价法、模糊综合评价法^[18-20]等。

1.3.1 水环境容量计算。 根据《水域纳污能力计算规程》^[21]、《全国水环境容量核定技术指南》^[22]和《环境影响评

作者简介 吴德慧(1987—), 女, 贵州独山人, 工程师, 硕士, 从事水环境的监测、水污染预警和防治工作。

收稿日期 2021-05-29; **修回日期** 2021-08-27

价技术导则《地表水环境》(HJ 2.3—2018)^[23],结合地表水环境质量现状及庆元县排污特点,选择 COD_{Cr}、NH₃-N 和 TP 作为容积值计算的主要调节影响因子。对于此次计算河道,采用混合过程段长度与计算河段长度比较来确定是否采用一维模型进行,若河段长度大于公式(1)计算的结果时,可以采用一维模型进行模拟。

$$L = \frac{(0.4B - 0.6a) \times B \times u}{(0.058H + 0.0065B) \times u_*} \quad (1)$$

$$u_* = \sqrt{gHJ} \quad (2)$$

式中, L 为混合过程段长度; B 为河流宽度; a 为排放口距岸边的距离,取0; u 为河流断面平均流速; H 为平均水深; g 为重力加速度,取9.18 m/s²; J 为河流坡度,取0.005。

水环境容量计算公式如下:

$$C_s = \frac{Q_5 C_5 - Q_4 C_4}{Q_3} \quad (3)$$

式中, C_s 为官山断面水质控制目标浓度(mg/L); C_5 为岩下

断面水质控制目标浓度(mg/L); Q_5 为岩下断面水流量(m³/s); C_4 为新窑断面实际水污染物浓度(mg/L); Q_4 为新窑断面水流量(m³/s); Q_3 为官山断面水流量(m³/s)。

1.3.2 水环境承载力评价。

1.3.2.1 评价指标和数据归一化处理。以庆元县作为研究区域,从水资源、水生态环境、社会经济3个系统中共选取19个综合评价指标(表1),构建了一个包含3个层次的庆元县水环境承载力评价指标系统,并对其中的数据进行归一化处理。运用模糊综合评价模型从时间维度综合研究庆元县的水环境承载能力情况。

评价分级标准的确定是水环境承载力研究的重要内容之一,其数值的设定将直接对评价结果的合理性和科学性产生影响。按照优、良、中、较差、差5个等级划分庆元县水环境承载力评价分级标准,其对应的代号分别为I(水环境承载能力强)、II(水环境承载能力较强)、III(水环境承载能力中等)、IV(水环境承载能力较弱)、V(水环境承载能力弱)。

表1 2014—2019年庆元县水环境承载力评价指标数据

Table 1 Data of water environment carrying capacity evaluation index in Qingyuan County from 2014 to 2019

水资源系统 Water resources system							
年份 Year	人均水资源量 Water resources per capita m ³	人均日用水量 Daily water consumption per capita//L	水资源总量 Total water resources 亿 m ³	用水总量 Total water consumption 亿 m ³	生态环境用水量 Ecological water consum- ption//亿 m ³		
2014	14 058.11	1 432.88	29.03	1.08	0.44		
2015	15 099.66	1 246.36	31.06	0.94	0.47		
2016	16 168.04	1 170.82	33.29	0.88	0.50		
2017	11 304.14	1 083.95	23.23	0.81	0.35		
2018	9 019.99	1 029.32	18.50	0.77	0.28		
2019	14 367.65	1 002.19	29.31	0.75	0.44		
水生态环境系统 Water ecological environment system							
年份 Year	绿化覆盖率 Green coverage %	万元 GDP 用水量 Water consu- mption per ten thousand yuan GDP//m ³	万元 GDP 化学 需氧量排放 COD emissions per 10 000 yuan GDP//kg	万元 GDP 氨 氮排放量 Ammonia nitrogen emissions per 10 000 yuan of GDP//kg	工业废水排 放达标率 Industrial wastewater discharge compli- ance rate//%	环保投资 占 GDP 比例 Percentage of environmental protection inv- estment to GDP//%	污水处理率 Sewage treatment rate//%
2014	28.15	216.00	4.91	0.55	95	0.85	82.66
2015	30.24	171.32	4.42	0.49	100	0.87	85.61
2016	36.09	149.47	4.08	0.46	96	0.92	91.05
2017	38.67	126.17	3.35	0.38	97	1.06	92.56
2018	37.80	107.68	2.96	0.33	99	1.08	94.94
2019	36.38	95.21	2.70	0.29	100	1.15	97.05
社会经济系统 Socioeconomic system							
年份 Year	人均 GDP GDP per capita 万元	城镇恩格 尔系数 Town Engel Coefficient//%	城市化水平 Urbanization level//×10 ⁴ hm ²	农田有效 灌溉面积 Effective irrigation area of farmland 人/km ²	人口密度 Population density 人/km ²	第三产业比重 Proportion of the third industry m ³ /万元	万元工业增 加值用水量 Water consu- mption per 10 000 yuan of industrial added value m ³ /人
2014	2.42	36.6	4.91	6.31	108.80	45.9	36.50
2015	2.66	35.8	5.06	6.31	108.38	47.8	34.63
2016	2.86	33.3	5.19	5.78	108.48	49.5	26.04
2017	3.14	29.2	5.45	5.62	108.27	50.6	21.22
2018	3.49	28.5	5.58	5.06	108.06	52.7	17.69
2019	3.84	28.2	5.68	5.03	107.48	53.6	13.51

1.3.2.2 综合权重的确定。采用层次分析法和熵权法计算评价指标的主观权重和客观权重,然后通过“乘法集成法”对2种方法所得权重进行组合,确定最终权重^[24]。其公式如下:

$$w^* = \frac{w_i \times w_j}{\sum_{i=1}^n (w_i \times w_j)} \quad (4)$$

式中, w^* 为指标*i*的综合权重; w_i 为熵权法计算得到指标*i*的权重; w_j 为层次分析法计算得到指标*i*的权重。根据公式(4)计算得到庆元县水环境承载力评价指标综合权重。

1.3.2.3 模糊综合评价模型的构建。模糊综合评价模型的理论基础来源于模糊数学,通过建立一个等级模糊的子集、利用模糊变换的原理和隶属度理论将一些具有确定性的评价方式转化成一些具有定量性的评价,从而有效地解决了人们主观上难以判断的模糊问题。具体步骤如下:

(1)建立评价指标集合*U*。设评价指标集合由*n*个评价指标构成,记作:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$$

(2)建立评价等级集合*V*。设每个评价指标有*m*个评价等级,记作:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$$

(3)建立评价指标权重集合*W*。由于每个评价指标对水环境承载力的影响程度不同,故需对每个评价指标赋予不同的权重,记作:

$$W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$$

其中, $0 < w_i < 1$,且 $w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = 1$ 。

(4)建立模糊关系矩阵*R*。确定评价指标集合中的任何一个评价指标隶属于评价等级集合中不同评价等级的程度,称为隶属度,用 r_{mn} 来表示,进而得到模糊关系矩阵*R*,记作:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

(5)隶属度函数的确定。通过隶属函数计算求得隶属

度,该研究采用模糊分布曲线中的“半梯形分布”作为各评价指标对各评价等级的隶属函数。该研究建立的水环境承载力评价等级集合分为5等,记为: $V = \{I, II, III, IV, V\}$ 。

(6)建立模糊综合评价模型*Z*。根据模糊关系矩阵*R*和权重向量*W*,计算得到模糊综合评价矩阵*Z*:

$$Z = R \times W \quad (5)$$

(7)计算综合评价值*Z**并确定隶属等级。采用加权平均法确定隶属等级。综合评价值公式如下:

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^n (z_j^k \times j)}{n \sum_{j=1}^n z_j^k} \quad (6)$$

式中,*k*为待定系数(*k*取2),目的是控制较大的 z_j 所带来的影响;*j*取5、4、3、2、1,依次表示评价等级I、II、III、IV、V,称为各等级的秩。

2 结果与分析

2.1 庆元县水环境容量分析 经多次测算,根据一维模型特点,化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)的降解系数*K*第一段分别为0.18、0.25、0.17 d⁻¹,第二段分别为0.26、0.35、0.27 d⁻¹。通过水环境容量计算公式(3)计算得该研究区主要的污染物COD_{Cr}、NH₃-N、TP的水环境容量分别为410.39、13.93、0.45 t/a。

2.2 庆元县水环境承载力分析 按照“1.3.1”方法,计算求得庆元县2014—2019年水环境承载力及各子系统综合评价值,详见表2。

2.2.1 各子系统综合评价值。根据表2的评价结果结合庆元县的实际发展情况,针对水资源、水生态环境、社会经济3个子系统分别进行动态趋势分析,并依据分析结果找出影响庆元县水环境承载力能力大小的主要因素。从2014—2019年庆元县各子系统综合评价值变化趋势(图1)可以看出,3个子系统中,水资源系统综合评价值一直处于较高水平,主要原因为庆元县人均水资源量较高,县域范围大,人口数量不多。水生态环境系统呈现逐年快速上升的趋势,其中2015—2017年上升明显,主要原因之一就是工业和企业进行环境

表2 2014—2019年庆元县水环境承载力综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of water environment carrying capacity in Qingyuan County from 2014 to 2019

年份 Year	系统 System	评价结果 Evaluation result					综合评价值 Comprehensive evaluation value	隶属等级 Affiliation level
		V	IV	III	II	I		
2014	水资源系统	0.226 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.773 7	0.937 0	I
	水生态环境系统	0.062 1	0.130 4	0.230 2	0.369 1	0.208 2	0.533 3	III
	社会经济系统	0.388 4	0.048 0	0.121 9	0.251 7	0.190 0	0.426 7	IV
	水环境承载力	0.200 7	0.042 6	0.079 8	0.135 0	0.541 9	0.759 7	II
2015	水资源系统	0.226 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.773 7	0.937 0	I
	水生态环境系统	0.057 8	0.040 7	0.270 6	0.205 0	0.425 9	0.580 9	III
	社会经济系统	0.388 4	0.025 7	0.162 9	0.255 6	0.167 4	0.390 3	IV
	水环境承载力	0.199 5	0.014 5	0.096 3	0.089 6	0.600 1	0.768 5	II
2016	水资源系统	0.226 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.773 7	0.937 0	I
	水生态环境系统	0.008 3	0.080 0	0.201 3	0.236 6	0.473 8	0.725 0	II
	社会经济系统	0.388 4	0.005 9	0.217 2	0.191 2	0.197 3	0.344 3	IV
	水环境承载力	0.185 6	0.023 1	0.083 7	0.090 4	0.617 2	0.803 0	II

接下表

续表 2

年份 Year	系统 System	评价结果 Evaluation result					综合评价价值 Comprehensive evaluation value	隶属等级 Affiliation level
		V	IV	III	II	I		
2017	水资源系统	0.226 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.773 7	0.937 0	I
	水生态环境系统	0.000 0	0.061 2	0.103 0	0.332 2	0.503 6	0.875 4	II
	社会经济系统	0.335 7	0.052 7	0.291 5	0.121 7	0.198 4	0.296 4	V
	水环境承载力	0.176 6	0.023 8	0.065 5	0.108 4	0.625 7	0.839 2	II
2018	水资源系统	0.226 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.773 7	0.937 0	I
	水生态环境系统	0.000 0	0.068 3	0.055 0	0.304 0	0.572 7	0.934 2	I
	社会经济系统	0.198 5	0.223 5	0.229 8	0.163 2	0.185 0	0.372 9	IV
	水环境承载力	0.159 4	0.047 2	0.044 3	0.105 7	0.643 4	0.865 3	II
2019	水资源系统	0.226 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.773 7	0.937 0	I
	水生态环境系统	0.000 1	0.077 8	0.027 9	0.274 5	0.619 7	0.956 0	I
	社会经济系统	0.061 3	0.402 5	0.166 9	0.183 2	0.186 1	0.452 8	IV
	水环境承载力	0.142 2	0.072 4	0.028 8	0.099 9	0.656 7	0.881 4	II

整治及五水共治工作的开展,万元 GDP 的用水量、化学需氧量和氨氮的排放量都有了明显下滑,环保投资逐年加大;2018—2019 年,相关二级指标变化放缓,相应的水生生态环境系统综合评价价值接近发展顶点。社会经济系统的综合评价价值在 2014—2017 年逐年下降,隶属于 IV 级较低可承载区间,期间,庆元县城市建设发展迅猛,偏远乡镇人口逐渐迁至城区,城市化水平快速提高,农田灌溉面积逐步下降,水环境承载力逐渐降低;2017 年后,万元级的工业生产增加值和居民用水量大幅度下降,人均居民 GDP 的经济增长速度大幅提高,产业结构不断深化调整和逐步优化,第三产业增加值所占的经济比重逐年稳步增加和快速上升,社会主义市场经济发展的各子系统也由此开始快速攀升,综合评价价值慢慢回升。

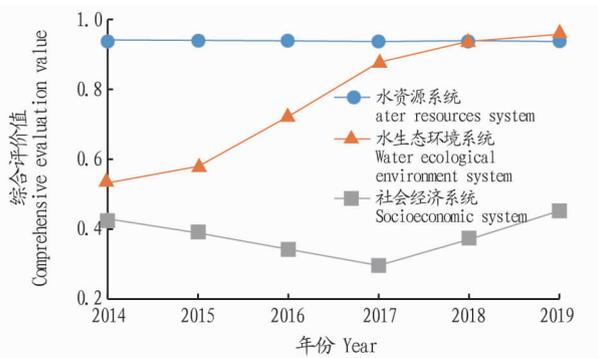


图 1 2014—2019 年庆元县水环境承载力各子系统变化趋势

Fig.1 Change trends of various subsystems of water environment carrying capacity in Qingyuan County from 2014 to 2019

2.2.2 水环境承载力综合评价价值。从 2014—2019 年庆元县水环境承载力综合评价价值变化趋势(图 2)可以看出,2014—2019 年庆元县水环境承载力综合评价价值呈显著上升趋势,结合原始数据发现其主要原因是在这 6 年内污水处理率逐年提高,同时万元 GDP 用水量、化学需氧量和氨氮排放量逐年减少,环保投资越来越大。结合 6 年间水环境承载力综合评价价值的变化以及各评价指标值变化的相互关系可以看出,水资源量对水环境的承载能力起着决定性的影响,是水环境

得以良好维持的基本条件。2014—2019 年水环境承载力综合评价价值处于 II 级较强可承载区间,表明庆元县水环境和水资源现状与现阶段社会经济发展基本协调的状态,水环境问题不明显。

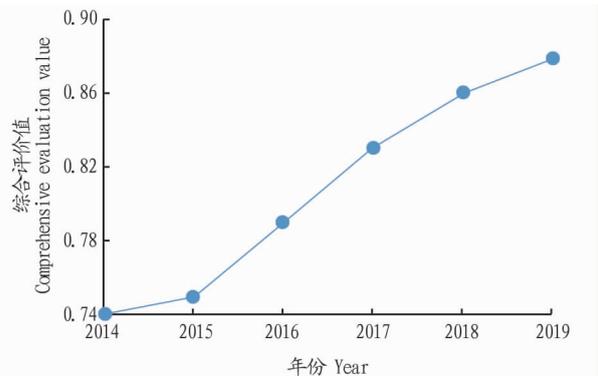


图 2 2014—2019 年庆元县水环境承载力变化趋势

Fig.2 Change trend of water environment carrying capacity in Qingyuan County from 2014 to 2019

3 结论

根据建立和模拟的水环境容量计算模型,对庆元县典型山区河流的水环境容量进行测算结果可知,目前该河段 COD_{Cr} 、 NH_3-N 、TP 水环境容量分别为 410.39、13.93、0.45 t/a,说明污水接纳区域污水污染物排放总量还未超出计算河段的承载范围。

在对庆元县水环境承载力情况进行理论和实践研究基础上,构建了水环境承载力评价指标体系,并在同一指标体系下,运用模糊综合从时间维度对水环境承载力进行评价,结果表明近年来水环境承载力基本呈逐年上升趋势,水环境与社会经济朝着好的方向发展。运用模糊综合评估模型对水环境承载能力各子系统进行了评价和分析,水资源、水生态环境、社会经济 3 个子系统的综合评价价值在 2014—2019 年局部存在变化,总体上均呈上升趋势。

参考文献

- [1] 胡雄光,徐荣华,徐海波,等.城市内河水环境承载力评价研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):105-109.
- [2] 王立峰.阿克苏水环境承载力变化分析[J].陕西水利,2020(4):50-52.

表 2 灵敏度和可重复性测试

Table 2 Repeatability of the event-specific method for MON87751

DNA 模板量(拷贝数) Amount of DNA(Copy number)	Ct 值 Ct value			Ct 平均值 Mean of Ct value	SD	RSD %
	1	2	3			
8 000 000	18.13	18.06	18.49	18.23	0.23	1.27
800 000	21.89	21.97	21.96	21.94	0.04	0.20
80 000	25.17	25.35	25.79	25.44	0.32	1.25
8 000	28.75	28.64	29.01	28.80	0.19	0.66
800	32.20	31.66	32.39	32.08	0.38	1.18
80	35.79	35.80	35.32	35.64	0.27	0.77
40	36.59	36.08	36.84	36.50	0.39	1.06

参考文献

- [1] 王红蕾. 浅谈中国 2020 年度大豆行业市场状况与区域竞争格局[J]. 山西农经, 2021(4): 104-105.
- [2] ISAAA GM Approval Database GM Crop Events List MON87751 [EB/OL]. (2013-01-12) [2020-03-31]. <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/event/default.asp?EventID=370>.
- [3] SAVINI C, MARETTI M, MAZZARA M, et al. Event-specific method for the quantification of soybean MON 87705 using real-time PCR validation report [R]. 2012.
- [4] European Union Reference Laboratory for GM Food and Feed (EURL GM-FF), Joint Research Centre (JRC), European Commission. Event-specific Method for the Quantification of Soybean MON 87751 Using Real-time PCR-Validation Report and Validated Method [R]. 2016.
- [5] MARMIROLI N, MAESTRI E, GULLÌ M, et al. Methods for detection of GMOs in food and feed [J]. Anal Bioanal Chem, 2008, 392(3): 369-384.
- [6] COTTENET G, BLANCPAIN C, SONNARD V, et al. Development and validation of a multiplex real-time PCR method to simultaneously detect 47 targets for the identification of genetically modified organisms [J]. Anal Bioanal Chem, 2013, 405(21): 6831-6844.
- [7] ANKLAM E, GADANI F, HEINZE P, et al. Analytical methods for detection and determination of genetically modified organisms in agricultural crops and plant-derived food products [J]. Eur Food Res Technol, 2002, 214(1): 3-26.
- [8] WU G, WU Y H, XIAO L, et al. Event-specific qualitative and quantitative PCR detection of genetically modified rapeseed Topas 19/2 [J]. Food Chem, 2009, 112(1): 232-238.
- [9] ZIMMERMANN A, LÜTHY J, PAULI U. Event specific transgene detection in Bt11 corn by quantitative PCR at the integration site [J]. LWT Food Sci Technol, 2000, 33(3): 210-216.
- [10] 雷水娟, 刘二龙, 卢丽, 等. 转基因棉花 MON88701 品系特异性实时荧光 PCR 检测方法的建立 [J]. 生物安全学报, 2019, 28(3): 225-229.
- [11] 袁俊杰, 魏霜, 龙阳, 等. 转基因大豆 MON87701 和 MON87708 双重实时荧光 PCR 检测技术的建立与应用 [J]. 农业生物技术学报, 2020, 28(2): 342-348.
- [12] 鲁军, 李刚, 赵建宁, 等. 5 种转基因油菜转化体特异性多重 PCR 检测方法 [J]. 生物安全学报, 2017, 26(3): 244-250.
- [13] 刘二龙, 卢丽, 吕英姿, 等. 转基因大豆 MON87701 和 MON87708 双重实时荧光 PCR 检测方法的建立 [J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(1): 272-278.
- [14] 刘二龙, 卢丽, 吕英姿, 等. 转基因甜菜 GTSB77 品系特异性实时荧光聚合酶链式反应检测方法建立 [J]. 中国食品卫生杂志, 2020, 32(1): 49-52.
- [15] 汪秀秀, 杨捷琳, 宋青, 等. 转基因棉花 GHB119 品系特异性定量 PCR 检测方法的建立 [J]. 农业生物技术学报, 2014, 22(3): 380-388.
- [16] 柏菊, 王振龙. 基于二维水质模型的淮北市区纳污能力计算 [J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2011, 11(1): 10-12.
- [17] 董飞, 刘晓波, 彭文启, 等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望 [J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 451-463.
- [18] 周刚, 雷坤, 富国, 等. 河流水环境容量计算方法研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(2): 227-234, 242.
- [19] 于雷, 吴舜泽, 范丽丽, 等. 河流水环境容量一维计算方法 [J]. 水资源保护, 2008(1): 39-41.
- [20] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型 [J]. 水利学报, 2004, 35(3): 65-70.
- [21] 熊健. 基于多层次模糊综合评判法的南宁市水资源承载力现状评价 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [22] 陈守煜, 胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载力评价中的应用 [J]. 水利学报, 2006, 37(3): 264-271, 277.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水域纳污能力计算规程: GB/T 25173—2010 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [24] 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.
- [25] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 地表水环境: HJ 2.3—2018 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [26] 张浩然. 基于三种评价模型的河南省水环境承载力研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.

(上接第 94 页)

- [3] 郑小康, 彭少明. 鄂尔多斯市水环境承载力分析及污染物限排研究 [C]//2014 中国环境科学学会学术年会论文集(第五章). 北京: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有限公司, 2014.
- [4] 马君梅, 戚华珍, 胡央群. 慈溪市地表水环境承载力研究 [C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2006 年学术年会优秀论文集(上卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 583-587.
- [5] 方晓波. 钱塘江流域水环境承载力研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [6] 姜大川, 肖伟华, 范晨媛, 等. 武汉城市圈水资源及水环境承载力分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 761-768.
- [7] 李辉艳, 帅红, 李晓鹏. 湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力研究 [J]. 人民长江, 2020, 51(5): 60-67, 190.
- [8] 段志新. 承德市水环境承载力研究 [J]. 陕西水利, 2020(6): 41-44.
- [9] 黄海凤, 林春绵, 姜理英, 等. 丽水市大溪水环境承载力及对策研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2004, 32(2): 157-162.
- [10] 潘祥东, 唐磊, 蒲迅赤, 等. 基于二维水质模型的盐津河纳污能力计算 [J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 72-75, 81.
- [11] 王富强, 王雷, 荣飞. 基于二维水质模型的新乡市河流纳污能力计算 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 81-84.
- [12] 高嵩, 金勇, 钱军, 等. 基于二维河网水动力水质模型的引水泵站规模论证研究 [J]. 水利技术监督, 2020, 28(5): 177-180.
- [13] 刘晓东, 华祖林, 谢增芳, 等. 一维河流水质模型多参数识别的反演优化通用算法 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 122-127.