

基于水足迹理论的云南省农业水资源 承载力 DEA 模型评价

何开为, 张代青, 侯璠, 李志勇

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 基于水足迹理论和方法, 计算和分析云南省 2000-2008 年农业耗水水足迹, 并结合相关社会与经济输入、输出指标, 建立 DEA 模型, 评价此 9 年间云南省农业水资源与农业经济系统的可持续发展状况, 定量分析云南省农业水资源相对承载力。结果表明: 云南省 2000-2003 年和 2006-2008 年的 7 年间皆达到 DEA 有效, 即农业水资源开发利用与社会经济发展之间的相对发展绩效达到最优, 技术和规模效益都有效; 云南省 2004 和 2005 年水资源相对承载力指数均小于 1, DEA 无效; 云南省 2000-2008 年间持续发展增长则较为缓慢, 呈现弱劣于可持续发展的轨迹。

关键词: 水足迹; DEA 模型; 水资源承载力; 农业; 云南省

中图分类号: TV211.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0126-06

Evaluation of DEA model about water resources carrying capacity of agriculture in Yunnan Province based on water footprint theory

HE Kaiwei, ZHANG Daiqing, HOU Jin, LI Zhiyong

(School of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Based on the theory and method of water footprint, the paper calculated and analyzed the water footprint of agricultural water consumption in Yunnan province from 2000 to 2008. According to the results of water footprint calculation and the related input and output indicators, this paper established DEA model so as to evaluate the situation of sustainable development of agricultural water resources and agricultural economic system in Yunnan province in nine years, and quantitatively analyzed the relative carrying capacity of agricultural water resources in Yunnan province. The results showed that ① during period of 2000 to 2003, 2006 to 2008, Yunnan province was effective based on DEA, which meant that the relative performance of development between the exploitation and utilization of agricultural water resources and the economic development achieved to the optimal, the technology and economy of scale were also effective; ② In Yunnan province, the relative bearing capacity index of water resources was less than 1 in 2004 and 2005, DEA of Yunnan province is ineffective; ③ the growth of sustainable development of Yunnan province is relatively slow and presented the weakly track of sustainable development.

Key words: water footprint; DEA model; water resources carrying capacity; agriculture; Yunnan province

1 研究背景

水资源匮乏是世界面临的难题。我国水资源总量位居世界第六, 但人均占有量居于世界第 110 位,

接近中度缺水水平。随着社会经济的发展 and 人口规模的增加, 人类消耗食品越来越多, 虚拟水消耗日益剧增。所谓“虚拟水”是指生产商品和服务所需要的水资源数量^[1-2], 它由伦敦大学 Tony Allan 教授

收稿日期: 2015-05-25; 修回日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469009); 云南省教育厅项目(14118489); 昆明理工大学 2013 年度大学生创新创业训练项目(201310674213)

作者简介: 何开为(1993-), 男, 云南昭通人, 本科生, 研究方向: 水文学与水资源工程。

通讯作者: 张代青(1974-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 讲师, 主要从事水资源系统规划与管理研究。

首次提出。虚拟水是以看不见的形式蕴涵在各种产品当中,如生产一个 100g 的苹果需要 70L 水,生产 1kg 牛肉需要 16t 水等。因此,社会产品消费实质上是间接的消费水资源。为了追踪产品中的虚拟水, Hoekstra 等^[3]于 2002 年提出水足迹的概念,并定义水足迹为任何已知人口(国家、地区或者个人)在一定时间内消耗的所有产品和服务所需要的水资源数量。由于虚拟水主要集中在人类产品或食物中,因此,农业耗水主要以虚拟水方式存在各种农业产品中。至今,国外虚拟水研究相对于国内而言已经成果丰硕,针对粮食安全与虚拟水战略、虚拟水战略对社会经济、水资源开发利用与管理、生态发展的影响、各类耗水产品虚拟水量化、全球虚拟水贸易等方面做出了大量研究工作。国内虚拟水研究还处于起步阶段,自程国栋院士首次引入其概念并计算了 2000 年西北各省(区)虚拟水消费量以来,大量研究者对国内各省农、畜产品虚拟水量、虚拟水进出口贸易、虚拟水战略等做出了定性或定量分析,为解决我国粮食安全、水资源管理、生态环境以及社会经济等问题提供了重要理论依据^[4-5]。但在工业产品的虚拟水量化和虚拟水战略的实际应用等方面研究不足,仍需要做进一步研究。

所谓水资源承载力,是指在某一历史发展阶段,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态良性循环发展为条件,在水资源得到合理开发利用下,该地区人口增长与经济发展的最大容量^[6]。它从整个地区的经济发展所需要的水资源供需平衡和生态系统保护出发,面对的是人口、资源、环境、经济等社会体系。基于水足迹理论评价区域水资源承载能力是一个新颖的命题,利用水足迹真实反映各用水部门水资源消耗情况的性质,可为水资源承载力计算提供更加准确的依据。数据包络分析法(DEA)是 1978 年美国运筹学家 Charnes 等在“相对效率评价”的基础上发展起来的一种系统分析方法^[7],可以对“多输入”和“多输出”的研究对象进行“有效性”评价。研究水资源承载力的实质是探讨一定社会经济发展阶段下水资源所能承受的人口增长和经济发展的最大容量,其研究方式具有“输入+系统+输出”的特点。因此,本文提出基于水足迹理论的水资源承载力 DEA 模型评价,并以 2000-2008 年云南省农业耗水为例,建立水资源承载力分析模型,计算和分析其水资源相对承载力,旨在评价云南省农业水资源开发利用与社会经济的产出状态、规模投入、技术效果

及其可持续发展水平状况,为云南省水资源的有效利用和社会经济的可持续发展提供技术支持。

2 农业水足迹计算

2.1 数据来源

(1) 云南省农作物产量、种植面积、畜禽出栏数来源于 2000-2008 年《云南统计年鉴》、2000-2008 年《中国畜牧业统计年鉴》;

(2) 云南省水产品产量来源于 2000-2008 年《中国渔业统计年鉴》;

(3) 云南省各地区气象数据与土地条件来源于 FAO 的 CLIMATE 数据库和 CROP 数据库有关中国部分的数据,动物虚拟水含量来源于国际虚拟水研究的中国动物虚拟水含量计算成果。

2.2 种植业水足迹计算

2.2.1 农作物产品虚拟水计算方法 目前计算农作物产品虚拟水含量的方法主要有两种,一种是 Chapagain 和 Hoekstra 提出的研究不同产品生产树(production tree)的方法^[8],另一种是 Zimmer 和 Renault 基于对不同产品类型的区分提出的计算方法^[9]。农作物产品虚拟水含量的具体计算视产品分类的不同而异。本文采用 Zimmer 和 Renault 的计算方法,根据其计算原理,农作物产品生产的需水量主要取决于农作物的类型、生长区域的自然条件、气候条件、地理条件、使用的灌溉系统和管理方式等综合因素。单一农作物产品虚拟水含量可以根据下列公式计算:

$$SWD[n, c] = \frac{CWR[n, c]}{CY[n, c]} \quad (1)$$

式中: $SWD[n, c]$ 为区域 n 作物 c 单位质量的虚拟水含量, m^3/kg ; $CY[n, c]$ 为区域 n 作物 c 的产量, kg/km^2 ; $CWR[n, c]$ 为区域 n 作物 c 的需水量, m^3/km^2 , 计算公式为:

$$CWR[n, c] = 10 \sum_{d=1}^{lp} ET_c[n, c, d] \quad (2)$$

式中: lp 为整个生长期天数; ET_c 表示在作物 c 的整个种植过程中,作物累计蒸发蒸腾量,它等于参考作物蒸发蒸腾水量 ET_0 与作物系数 K_c 的乘积,即

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (3)$$

式中: K_c 可通过联合国粮农组织(FAO)提供的 Cropwat8.0 软件获得; ET_0 可根据 FAO 推荐的彭曼公式^[10]计算。

2.2.2 种植业水足迹的计算 根据来源于 FAO 的 CLIMATE 数据库和 CROP 数据库有关中国部分的

2007年云南省各地区气象和土壤数据,采用FAO推荐的彭曼公式计算得到16个州市8种类型作物需水量CWR,采用该类型作物需水量乘以各地区作物种植面积占全省比例进行加权计算,获得全省不

同初级作物产品的平均需水量。考虑不同作物单位面积产量和最终作物产品加工转化率,得到不同作物产品虚拟水含量,将其乘以作物产量即得到种植业耗水足迹。分别见表1和表2。

表1 主要作物产品单位质量虚拟水含量

产品种类	初级产品最终产品率 V	作物生长需水 CWR/(m ³ ·km ⁻²)	面积作物产量 CY/(kg·km ⁻²)	初级产品虚拟水含量 SWD/(m ³ ·kg ⁻¹)	最终产品虚拟水含量 VWL/(m ³ ·kg ⁻¹)
稻谷	0.7	362388	595536	0.61	0.87
小麦	0.7	545867	213683	2.55	3.65
玉米	1	346724	388893	0.89	0.89
豆类	1	194631	15339	1.27	1.27
薯类	1	316727	288766	1.10	1.10
油料	0.38	398914	167555	2.38	6.27
蔬菜	1	328976	1981213	0.17	0.17
水果类	0.8	714128	763484	0.94	1.17
烤烟	0.5	345842	208586	1.66	3.32
茶叶	0.5	296947	56083	5.29	10.59

注: V = SWD / VWL,不同作物初级产品换算成最终产品的方法,依据我国统计部门的折算方法。

表2 种植业水足迹

10⁸ m³

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
种植业水足迹	267.38	270.23	274.65	275.97	288.13	288.27	291.97	307.39	323.89

2.3 畜牧业与渔业水足迹计算

根据Hoekstra提出的计算公式^[11-13]来计算畜牧业水足迹:

$$WF_{ah} = \sum (WF_i \times a_i) \quad (4)$$

式中: WF_{ah} 为该地区畜牧业水足迹; WF_i 为不同畜禽品种的水足迹; a_i 为不同畜禽品种的出栏数。

渔业水足迹因种类繁多、数据有限,考虑直接采用水产品产量与水产品单位质量虚拟水的乘积作为渔业水足迹。

本文以牛、马、猪、羊、驴、骡、家禽作为畜牧业水足迹计算的畜禽品种。参考国际虚拟水研究的中国动物虚拟水含量计算成果的动物虚拟水含量及水产品单位质量虚拟水 5 m³/kg,考虑各类畜禽品种出栏数及水产品产量得到畜牧业、渔业水足迹。分别见表3、4。

3 DEA模型在云南省农业水资源承载力的实证研究

3.1 DEA模型简介

DEA模型^[14-15]采用数学规划方法,把每一个

表3 主要动物虚拟水含量

畜禽品种	单位数量动物/ (t·head)	动物虚拟水含量/ (m ³ ·t ⁻¹)	单位动物虚拟水含量/ (m ³ ·head ⁻¹)
牛	0.2	12596	2519.20
马	0.15	5871	880.65
猪	0.09	2522	226.98
羊	0.04	5948	237.92
驴	0.12	4956	594.72
骡	0.12	4895	587.40
家禽	0.0018	3652	6.5736

表4 畜牧业、渔业水足迹

10⁸ m³

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
畜牧业水足迹	307.22	293.07	283.93	290.27	301.57	300.32	287.22	286.7	291.14
渔业水足迹	8.31	9.01	9.63	10.22	11.03	11.94	14.64	11.85	12.75

被评价单位作为一个决策单元(Decision making units, DMU),由众多 DMU 构成被评价群体,通过对投入和产出比率的综合分析,以 DMU 中各个投入和产出指标的权重为变量进行评价运算,确定各 DMU 是否为 DEA 有效。结合水资源承载力的性质,其中的众多评价指标作为模型的 DMU,相对有效值 θ 即可作为水资源相对承载力,由此构成水资源承载力评价模型。

本文采用 DEA 模型中的 C^2R 模型,假设有 n 个参加评比的部门或单位(DMU),每个部门有 m 种输入和 s 种输出。

C^2R 的分式规划问题模型为:

$$\begin{cases} \max \frac{U^T Y_0}{V^T X_0} = V'_p \\ \frac{U^T Y_j}{V^T X_j} \leq 1 \\ U \geq 0, V \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

为了方便求解判断,引入了非阿基米德无穷小量,得到具有阿基米德无穷小参数的 C^2R 模型为:

$$(D_{C^2R} - \varepsilon) \begin{cases} \min [\theta - \varepsilon(e^T s^- + e^T s^+)] = V_D(\varepsilon) \\ \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j + s^- = \theta X_{j_0} \\ \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j - s^+ = Y_{j_0} \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: \hat{e} , e 分别为分量为 1 的 m 维, s 维列向量。对于 $(D_{C^2R} - \varepsilon)$ 利用单纯型法求解。若 $(D_{C^2R} - \varepsilon)$ 的最优解为 $\lambda_0, s^-, s^+, \theta^0$, 则当 $\theta^0 = 1$ 时并且 $s^- = s^+ = 0$ 时, 决策单元 j_0 为 DEA 有效, 其形成的有效前沿面为规模不变, 且 DMU 为规模且技术有效; 当 $\theta^0 = 1$ 时并且 $s^- \neq 0$ 或 $s^+ \neq 0$ 时决策单元 j_0 为弱 DEA 有效, 则技术无效; 令 $K = 1/\theta \sum_{j=0}^n \lambda_j$, 当 $K = 1$ 时, 称 DMU 规模有效, $K < 1$ 时, 规模收益递增, $K > 1$ 规模收益递减。当 $\theta^0 < 1$ 时决策单元无效, 或者是技术无效, 或者是规模无效, 若: $s^- = s^+ = 0$ 时, 则技术有效; 当 $K = 1$ 时, 称 DMU 规模有效, $K < 1$ 时, 规模收益递增, 反之递减。

3.2 模型指标选取

在 DEA 评价过程中, 根据评价的目的, 选择能反映成本投入型指标数据作为输入, 能反映效益产出型的指标数据作为输出^[16-18]。在水资源承载力的研究中, 把水资源、人口、环境、社会经济作为一个系统, 运用 DEA 评价方法研究水资源于人口与社会经济系统中的承载力和可持续发展状况。同时, 本文基于水足迹理论, 分析云南省农业用水的真实情况, 即农业水足迹, 作为水资源承载力研究的依据和指标。由此本文选取农业从业人员、种植业水足迹、畜牧业水足迹、渔业水足迹为 DEA 模型输入指标, 农业有效灌溉面积、农田灌溉亩均用水量、农村人均生活用水量升、农业总产值等 4 个指标作为输出指标。见表 5。

表 5 DEA 模型输入、输出数据

年份	输入数据				输出数据			
	种植业水足迹/ (10^8 m^3)	畜牧业水足迹/ (10^8 m^3)	渔业水足迹/ (10^8 m^3)	农业从业人员/万人	农业有效灌溉面积/ km^2	农田灌溉每平方公里用水量/ ($10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	农村人均生活用水量 /($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$)	农业总产值/ 10^8 元
2000	267.38	307.22	8.31	1674	14204	593	72	680.86
2001	270.23	293.07	9.01	1689	14325	577	71	703.53
2002	274.65	283.93	9.63	1696	14447	570	68	737.55
2003	275.97	290.27	10.22	1690	14570	563	64	799.33
2004	288.13	301.57	11.03	1694	14694	556	62	965.22
2005	288.27	300.32	11.94	1690	14854	554	62	1068.58
2006	291.97	287.22	14.64	1677	15024	543	64	1209.76
2007	307.39	286.70	11.85	1664	15172	524	68	1414.79
2008	323.89	291.14	12.75	1659	15368	505	70	1641.46

注: 农业从业人员、农业总产值数据来源于 2000 - 2008 年《云南统计年鉴》; 农业有效灌溉面积数据来源于 2000 - 2008 年《中国农村统计年鉴》; 农田灌溉亩均用水量、农村人均生活用水量数据来源于 2000 - 2008 年《云南省水资源公报》。

3.3 模型结果分析

根据表5输入和输出数据,利用 Matlab 数学软件进行模型参数计算,得到相关评价结果见表6。由其评价结果可以对云南省农业2000-2008年的水资源相对承载力和可持续发展情况进行分析:

(1)云南省水资源较为丰富,在2009年出现全省连旱之前的2000-2008年间平均降雨量充沛,加之农业作为云南省最主要产业支柱。因此,基于丰富的水资源优势以及政府对农业产业优化、设施建设的重视,云南省农业在2000-2003、2006-2008年的7年间水资源相对承载力指数均为1,即农业水资源开发利用与社会经济产出相对达到了最优的状态,其规模发展恰当,技术有效,综合效益达到了最优。仅2004年和2005年两年水资源相对承载力指数小于1,最低年份也达到了0.9880。

表6 DEA模型评价结果

年份	水资源 相对承 载力 θ	$K = \frac{1}{\theta} \sum_{j=0}^n \lambda_j$	DEA相 对有 效性	规模 有效 性	技术 有效 性	可持续 发展 轨迹
2000	1	1	有效	恰当	有效	
2001	1	1	有效	恰当	有效	弱劣于轨迹
2002	1	1	有效	恰当	有效	弱劣于轨迹
2003	1	1	有效	恰当	有效	弱劣于轨迹
2004	0.9880	1.0106	无效	递减	无效	劣于轨迹
2005	0.9991	1.0072	无效	递减	无效	在轨迹上
2006	1	1	有效	恰当	有效	在轨迹上
2007	1	1	有效	恰当	有效	弱劣于轨迹
2008	1	1	有效	恰当	有效	弱劣于轨迹

(2)2004-2005两年指数较低,分别为0.9880、0.9991,表明该两年的农业水资源开发利用与社会经济产出相对未达到最优状态,规模发展递减,技术效益无效,其在各项指标之间资源配置和产出还没有实现科学合理配置。进一步分析可知,2004-2005两年是云南省罕见的气温典型偏高、年降水量和年日照时数都显著偏少年份,且农业气象灾害频发,使得作物产量受严重影响;再加之青壮年劳动力外出务工人员日益增加,致使农业从业人员的技术有效性不高,因此导致投入产出的效率不高,水资源相对承载力指数低于1。

(3)从可持续发展水平上看,因为2001-2003年、2007-2008年综合效益均达最优,持续发展增长缓慢,所以均是弱劣于可持续发展的轨迹上;2004年处于劣于可持续发展的轨迹上,规模递减,水资源、劳动力的分配不合理,社会各部门间协调不佳。

2005和2006两年做出相应调整,重新回到可持续发展轨迹上,直至综合效益达到最优。

4 结 语

农业用水在全社会用水中占有很大比例,其对全社会水资源消耗量变化有着重要影响。本文基于水足迹理论能反映区域一定时间内消耗的所有产品和服务所需要水资源数量的特性,将其运用于云南省农业水资源承载力的研究中,计算2000-2008年间各类用水行业的水足迹,并引入DEA评价方法,将水资源、人口、环境和社会经济等融合为一个复合系统,利用其中相关指标构建一个水资源承载力评价模型。数据化评价云南省农业水资源开发利用、水资源相对承载力、可持续发展等状态。研究表明除2004、2005年外,云南省农业水资源开发利用与社会经济发展之间的相对发展绩效都十分理想,但因受气象灾害及劳动力质量等因素影响,此两年相对发展绩效较低,综合效益未达到最优。说明了云南省农业部门对防灾减灾、劳动力分配和农业设施建设等工作还有待提高。同时,九年间可持续发展效益增长缓慢,发展轨迹较不稳定。所以要求在保持现阶段水平的同时,充分利用云南省丰富的人力资源,加强劳动力资源的开发和整合,优化农业产业结构,增加农业高新技术产品的研发和生产,实现农业的水资源利用效率最大化。

运用水足迹理论并结合DEA模型对水资源承载力进行研究是一个新颖的课题,拓展了水资源承载力的研究深度与范围。能够较准确地反映研究地区水资源开发利用与社会效益、经济产出的规模发展、技术效益、综合效益、可持续发展等状况。为研究区的农业水资源承载力研究、优化农业产业结构、系统管理与规划水资源、提高水资源利用效率等提供一定的科学依据和数据参考。

水资源承载力的研究涉及了人口、资源、环境、经济等诸多社会体系。本文并没有全面地对每一个可能影响体系做出定性判断和定量分析。因此,在未来的研究中希望能够考虑不同可能影响体系,分析相关输入和输出指标下的DEA水资源承载力评价模型,得到更准确、合理的水资源承载力评价方法。

参考文献:

- [1] Allan J A . Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro political futures would be impossible

- [C]//. Priorities for Water Resources Allocation and Management, London: ODA, 1993.
- [2] Allan J A. Overall perspectives on countries and regions. Water in the Arab world: perspectives and prognoses. [M]. Massachusetts: Harvard University press, 1994.
- [3] Hoekstra A Y. Virtual water: an introduction. Virtual Water Trade [C]//. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series, 2003.
- [4] 龙爱华,徐中民,张志强,等. 西北四省(区)2000年的水资源足迹[J]. 冰川冻土,2003,25(6): 692-700.
- [5] 王钟书. 农产品虚拟水及云南省种植业结构优化[D]. 昆明:云南大学,2010.
- [6] 李令跃,甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展,2000,11(3): 307-313.
- [7] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978,2(6):429-444.
- [8] Chapagain A, Hoekstra A Y. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products [C]//. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, IHE DELFT, 2003.
- [9] Zimmer D, Renault D. Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary results [C]//. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, IHE DELFT, 2003.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements [C]//. FAO irrigation and drainage paper 56, Rome, 1998.
- [11] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products [C]//. Value of Water Research Report Series No. 13, Netherlands, Delft: UNESCO - IHE Institute for Water Education, 2003.
- [12] 虞祎,张晖,胡浩. 基于水足迹理论的中国畜牧业水资源承载力研究[J]. 资源科学,2012,34(3): 394-400.
- [13] 关博. 基于虚拟水理论的三江平原农畜产品需水量研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2009.
- [14] 朱乔. 数据包络分析(DEA)方法的综述与展望[J]. 系统工程方法应用,1994,3(4):1-9.
- [15] 魏权龄. 评价相对有效性的 DEA 方法: 运筹学的新领域[M]. 北京:中国人民大学出版社,1988.
- [16] 刘晓平,李磊. 基于 DEA 的水资源承载力的计算评价[J]. 科技与管理,2008,10(1): 13-15.
- [17] 孙才志,闫冬. 基于 DEA 模型的大连市水资源-社会经济可持续发展评价[J]. 水利经济,2008,26(4): 1-4.
- [18] 刘晓平. 基于可持续发展的水资源承载力研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.

(上接第125页)

- [6] 甄宝勤. 玉米芯处理含锌废水的研究[J]. 辽宁化工, 2005,34(10): 427-428+431.
- [7] Tan Guangqun, Yuan Hongyan, Liu Yong, et al. Removal of lead from aqueous solution with native and chemically modified corncobs [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,174(1-3): 740-745.
- [8] Leyva-Ramos R, Landin-Rodriguez L E, Leyva-Ramos S, et al. Modification of corncob with citric acid to enhance its capacity for absorbing cadmium(II) from water solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2012,180(1): 113-120.
- [9] Nollet H, Roels M, Lutgen P, et al. Removal of PCBs from wastewater using fly ash[J]. Chemosphere, 2003,53(6): 655-665.
- [10] Özcan A S, Erdem B, Özcan A. Adsorption of Acid Blue 193 from aqueous solutions onto Na-bentonite and DTMA-bentonite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004,280(1): 44-54.
- [11] El-Shahawi M S, Nassif H A. Retention and thermodynamic characteristics of mercury (II) complexes onto polyurethane foams [J]. Analytica Chimica Acta, 2003,481(1): 29-40.
- [12] 吴唯,薛扬,徐嘉凉,等. 层析聚酰胺树脂对茶多酚的吸附热力学和吸附动力学研究[J]. 塑料工业, 2008,36(7): 42-45.