

区域农业生产系统用水正负效益分析及能值评估

郭 溪,吴泽宁,王慧亮

(郑州大学水利与环境学院,河南 郑州 450001)

摘要:从生态经济学的角度,运用能值分析方法,在分析区域农业生产系统各种生态流投入产出的基础上,探讨了农业生产用水的正负效益,进而以“能值”作为统一的度量尺度,完善了农业生产用水正负效益的计算方法。以郑州市为例,计算了该市 2011 年农业生产系统用水的正负效益,其中正效益为 1.62×10^{21} J,负效益为 6.82×10^{20} J,负效益约为正效益的 42.10%,表明郑州市农业生产用水存在负面问题较为严重。认为提高水资源及伴随的可更新资源的利用效率,尽量减少不可更新资源的不合理投入和利用,避免因环境污染和地下水超采引发的危害,是减小农业生产用水负效益的关键。

关键词:水资源;正负效益;农业生产系统;能值分析;郑州市

中图分类号:P339; S271 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)04-0001-05

Emergy evaluation of positive and negative effects of water utilization in regional agricultural production system//
GUO Xi, WU Zening, WANG Huiliang(*School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

Abstract: Based on analysis of the input and output of various ecological flows in a regional agricultural production system, the positive and negative effects of agricultural water utilization were evaluated through emergy analysis from a perspective of ecological economics. Then, with the emergy as a normalized basis, the method of calculating the positive and negative effects of agriculture water utilization was improved. Using Zhengzhou City as an example, the positive and negative effects of water utilization in the agricultural production system of the city in 2011 were calculated. The results show that the positive effect was 1.62×10^{21} J, and the negative effect was 6.82×10^{20} J, which was about 42.10% of the positive effect, indicating that the city's agriculture water utilization was in a significantly negative situation. Improving the utilization efficiency of water resources and the accompanying renewable resources while minimizing the unreasonable investment and utilization of nonrenewable resources, and avoiding the harm caused by environmental pollution and overexploitation of groundwater are the keys to solving the problem of negative effects of agricultural water utilization.

Key words: water resources; positive and negative benefits; agricultural production system; emergy analysis; Zhengzhou City

水是一切农作物生长所必需的基础物质,是农业的命脉,也是整个国民经济和人类生活的命脉^[1],农业用水的可持续发展对国家和地区的可持续发展起着至关重要的作用^[2]。农业生产系统用水主要是通过农作物的光合作用和呼吸作用,将水的化学能转化为有机态的化学能,为人类提供赖以生存的农产品和工业原料。然而长期的高强度土地利用、过量工业辅助能投入^[3],以及不合理的水资源开发与利用必然会引起一系列的生态环境损失^[4],如水质下降、水土流失、生态植被退化、地下水位变化等^[5]。农业生产系统是“光、热、水、土”等自然因素与“化肥、种子、人力、技术”等人为因素共同作用的系统,由于难以将各种因素统一定量研究,目前在农业用水正负效益方面的定量计算较少,大多是定性分析。而生态经济学中的能值理论和分析方法^[6]为解决这一问题提供了一种途径。本文在总结农业生产系统各种生态流的基础上,从能量转化的角度,采用能值分析方法计算郑州市 2011 年农业生态系统用水的正负效益,指出郑州市农业用水存在的问题,为其农业用水优化配置以及节水型农业的发展提供参考。

1 农业生产用水正负效益的能值分析方法

1.1 农业生产用水的正负效益概念

现代农业是高度集约利用自然环境资源和社会经济资源的大规模产业,农业生产过程中通过对水资源的有效利用和转化,不仅为人类提供赖以生存的食品和工业原料,同时获得各种农产品的化学能。农业生产产出的能量主要是各种农产品的化学能,但其不全是农业用水的产出,水资源只有通过和其他资源、劳务等多种投入共同作用,才能生产出农产品价值^[3]。因此,通过整个系统中水资源对农业生产贡献率与贡献量的计算,提取出水资源对应产生的价值,即为农业生产系统用水的正效益。

与此同时,农业用水会使水成为环境要素中变化最快的因子。首先,农业生产用水包括大量的地下水,而地下水的流动性与可控性均较弱^[5],这一特点使得在地下水的开发利用过程中,无论从水量还是水质上都是极难恢复的。一旦人类农业生产活动带来的水资源改变量超过了环境的承受能力,比如地下水超采,随之而来的就是相应的自然灾害及经济发展受限等。其次,人类在现代农业生产中,对自然环境资源的过度开发和工业辅助能的大量投入以及不合理利用,也会对生态环境造成污染和破坏,带来一系列的生态环境损失。如种植业中化肥等的利用会导致水体、土壤、大气污染,畜牧业中的养殖污水会造成环境损失,未被动植物吸收利用的部分投入也会造成价值流失和生态失衡等一系列生态环境问题^[7]。因此,本文将地下水超采造成的直接损失,生产过程中的环境污染、水土流失和生态失衡等间接损失归纳为农业生产用水负效益。

1.2 农业生产用水的正负效益计算

1.2.1 能值理论简介

20 世纪 80 年代,美国著名生态学家 Odum^[6]创立了能值理论与方法,为生态系统和生态经济系统的定量分析研究开拓了新途径。能值(emergy)是指一种流动或贮存的能量所包含另一种类别能量的数量,不同品质的能量之间存在一个转换关系——能值转换率(emergy transformity),即形成每单位物质或能量所含有的另一种能量的量^[8]。由于各种能量均直接或间接源于太阳能,能值分析以能值为基准,将系统中不同种类不可比较的能量通过太阳能值转换率转换成同一标准的太阳能值(solar emergy,单位为太阳能焦耳 solar emjoules),转换计算公式为

$$E_M = \tau B \tag{1}$$

式中: E_M 为能值, J; τ 为能值转换率, J/J 或 J/g;

B 为能量或物质的量, J 或 g。

近 10 多年来,能值分析方法和应用研究十分活跃。在国际上,20 世纪 80 年代美国科学基金组织率先开展能值研究^[9],意大利、瑞典、澳大利亚等国^[6,10]于 90 年代也相继开展。我国于 20 世纪 90 年代由留美学者蓝盛芳引入能值理论,开展了国家与地区^[11-12]、农业^[13-14]、湿地^[15]和城市方面^[16]的能值分析和理论方法研究。目前,在广州、南京、上海、北京等地的大学和科研单位均进行了有关研究,已有 3 个能值分析研究项目得到国家自然科学基金资助^[17]。在水资源领域,一些学者将其应用在水资源生态经济价值^[18]、水资源系统生态经济评价^[19]、用水效率^[20]等方面,取得了丰富的成果。

农业生产系统是人类所控制和管理“自然-人工复合经济系统”,其能量流动特征不同于自然生态系统,在很大程度上受制于人类活动。在分析农业生产系统的能流动态时,既要考虑自然生态系统的能流,又要考虑人类社会经济系统的能流^[21]。以能值作为统一的度量尺度来计算农业用水的正负效益,其具体步骤为:①对农业生产系统的能量流动特征及过程做全面分析,收集各项数据;②列举计算系统主要能值投入及产出,编制能值分析表,构建农业生产系统能量图;③计算农业用水的正负效益能值,评价农业用水的实际能值效益。

1.2.2 正效益的能值计算方法

农业用水来源主要包括三部分:有效降水、地表水和地下水,利用水资源对农业生产的能值贡献率 W_{CR} ^[11],计算出水资源对农业生产的贡献量 W_{CQ} ,即为农业生产用水正效益 P_B 。水资源对农业生产的贡献率为

$$W_{CR} = \sum_{i=1}^3 r_i / U_i \tag{2}$$

其中
$$\sum_{i=1}^3 r_i = r_p + r_{sw} + r_{gw} \tag{3}$$

$$r_i = \tau_i l_i \tag{4}$$

式中: U_i 为农业生产系统投入总能值; r_p 、 r_{sw} 、 r_{gw} 分别为有效降水能值、地表水能值和地下水能值; l_i 为各项水资源的利用量; τ_i 为各项相应的能值转化率。

农业生产用水正效益为

$$P_B = W_{CQ} = \sum_{i=1}^4 S_o W_{CR} \tag{5}$$

式中 $\sum S_o$ 为农业生产系统产出总能值。

1.2.3 负效益的能值计算方法

农业生产用水负效益 N_B 包括地下水超采造成的能量损失、化肥等辅助能带来的环境污染、农业生产活动耦合作用造成的水土流失以及农业生产系统

整体的生态失衡,农业生产用水负效益可用以上四方面对应损失的能值之和来表示。

a. 地下水超采负效益。地下水超采负效益 r_{gc} 主要计算伴随的灾害程度、经济发展水平以及人口密度^[22] 损失,计算公式为

$$r_{gc} = (0.0011E_p + 12.434)A\tau_{gc} \tag{6}$$

其中
$$E_p = \frac{2}{3}G_{GDP} + \frac{1}{3}P_r \tag{7}$$

式中: E_p 为计算地下水超采经济损失的复合参数; τ_{gc} 为能值转换率; G_{GDP} 为地均 GDP; P_r 为人口密度; A 为计算区域面积。

b. 环境污染负效益。环境污染负效益 r_{ep} 主要计算种植业中化肥导致的水体、土壤、大气污染和畜牧业中养殖污水造成的环境损失,根据化肥施用量及单位化肥环境成本、畜牧业排放污水量及水污染损失能值转换率进行估算:

$$r_{ep} = q_f l_f + q_w \tau_w \tag{8}$$

式中: q_f 为化肥施用量; l_f 为单位化肥施用的环境成本; q_w 为畜牧业排放污水量; τ_w 水污染损失能值转换率。

c. 水土流失负效益。水土流失负效益 r_{wl} 主要计算农业生产活动耦合作用造成的水土流失,为水土流失量与其太阳能值转换率之积:

$$r_{wl} = m_{wl} \tau_{wl} \tag{9}$$

式中: m_{wl} 为水土流失量; τ_{wl} 为流失水土的太阳能值转化率。

d. 生态失衡负效益。生态失衡负效益 r_{sj} 主要计算生物多样性的减少损失,由于数据方面的局限,参考美国佛罗里达大学环境政策中心的相关研究成果^[23],以农业用水造成的野生动物能值损失来代替生物多样性减少进行简化计算,即以人类取用水资源造成野生动物的能值损失进行计算,为地表水、地下水化学能与取用单位地表水、地下水的野生动物损失能值的乘积之和:

$$r_{sj} = w_s r_s + w_g r_g \tag{10}$$

式中: w_s 、 w_g 分别为地表水化学能和地下水化学能; r_s 、 r_g 分别为取用单位地表水和地下水的野生动物损失能值。

综上所述,农业生产用水负效益的能值为

$$N_B = r_{gc} + r_{ep} + r_{wl} + r_{sj} \tag{11}$$

2 实例应用

2.1 研究区概况

郑州位于河南省中部偏北,东经 112°42′~114°14′,北纬 34°16′~34°58′,北临黄河,西依嵩山,东南为广阔的黄淮平原。郑州地区属暖温带大陆性气候,

四季分明,多年平均气温 14.4℃,多年平均降雨量 640.9 mm,无霜期 220 d,全年日照时数约 2 400 h。境内大小河流 35 条,分属于黄河和淮河两大水系,其中黄河郑州段 150.4 km。全市多年平均水资源总量为 13.4 亿 m³,人均水资源量为 210 m³。

郑州市地貌复杂、土壤类型多,雨量适中,适宜多种农作物的生长,主要作物有小麦、玉米、红薯、大豆、水稻、谷物、棉花、花生、烟叶、白菜、大葱、土豆、西瓜等。郑州市现代农业水平较高,近些年农业用水问题日益突出。在各种用水中,农业灌溉用水所占比重一直最大。然而,由于现代农业技术的推广,农业用水呈逐年减少的趋势^[24]。2002 年郑州市农业灌溉用水量为 8.79 亿 m³,占用水总量的 55.7%;2011 年郑州市农业灌溉用水量为 3.39 亿 m³,占用水总量的 20.8%。2002 年到 2011 年农业用水平均每年减少约 0.54 亿 m³。

2.2 系统能量网络和能值流指标计算

根据郑州市农业生产系统的基本结构和主要能源、物质、信息等生态经济流情况,构建郑州市农业生产系统能量系统如图 1 所示。能值投入包括可更新自然资源(阳光、风能、地表水、地下水、雨水等)、不可更新自然资源(土壤)、可更新有机能(种子、人力、畜力、有机肥等)、不可更新工业辅助能(化肥、农药、电力、农用机械等),其中用水来源主要包括有效降水、地表水和地下水,能值产出主要为各种农产品,除了一小部分农产品满足农民生活需要和留做种子外,大部分均进入市场。

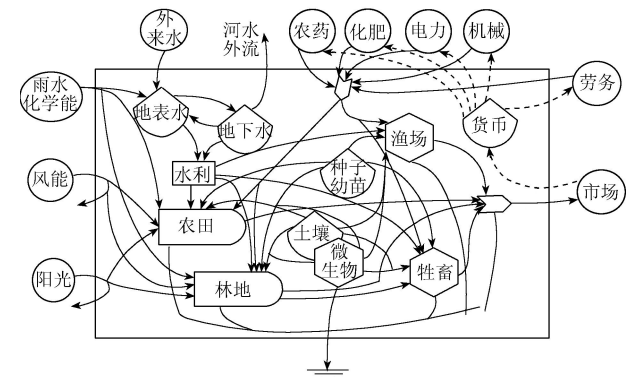


图 1 郑州市农业生产能量系统

根据收集的原始数据及相应能值转换率计算各种生态流的能值,将其分类汇总,编制能值分析表。其中,有效降水取农业用地降水量的 51%^[25],地表水、地下水原始数据来自于《河南省水资源公报 2011》,其他原始数据来自于《郑州市统计年鉴 2012》,能量换算参照文献[26-27],能值转换率、能值/货币比率数据参照文献[8,18]。

郑州市 2011 年农业用水中,有效降水为 7.22 亿 m³,

地表水为 0.99 亿 m³,地下水为 3.20 亿 m³。有效降水所占比例最大,但这部分水资源通常被忽视;其次是地下水,这与郑州市的地下水开发利用程度较高有关;而郑州市地表水资源相对匮乏,所以农业所用地表水也较少^[24]。虽然雨水用量远远多于地表水、地下水,但由于其能值转换率较低,有效降水能值仅为 5.51×10¹⁹J。远低于地下水的能值 4.07×10²⁰J,地下水能值占农业用水能值的 77.7%,地下水的大量开采加剧了地下水水位的下降。

郑州市 2011 年能值产出总量为 2.22×10²²J,其中种植业、林业、牧业、渔业产品能值所占比重依次为 34.10%、0.01%、58.80%、7.19%。由此可知,畜产品在郑州市农业产业结构中占主导地位,这也表明人们日常生活中对其需求量较高;而林产品在能值产出中所占比重极小,这与郑州市保护森林、严禁砍伐林木的生态环保政策密切相关^[28]。

2.3 郑州市农业用水正负效益计算

2.3.1 农业用水正效益计算结果

根据第 1.2.2 节所述方法计算农业生产的贡献率和产出能值。

2011 年郑州市农业生产系统中总投入能值为 7.20×10²¹J,其中水资源投入能值为 5.24×10²⁰J,对应得出水资源对农业生产的贡献率为 7.28%。因此,在 2.22×10²²J 的总产出能值中,水资源对农业生产的贡献量达到 1.62×10²¹J。综上所述,郑州市 2011 年农业生产用水正效益为 1.62×10²¹J。

2.3.2 农业用水负效益计算结果

郑州市 2011 年农业生产用水负效益的计算结果见表 1,其中地下水超采损失计算参考文献[23]。水土流失损失计算参考文献[29],2011 年郑州市水土流失面积取 5 km²,按土壤流失量 1362.4 t/km²^[30]计算,郑州市每年因为农业生产导致水土流失损失土壤 6810 t。

表 1 郑州市 2011 年农业用水负效益计算

项目	原始数据	能值转换率	太阳能值/ 10 ¹⁹ J
地下水超采	132346 万元	19.33×10 ¹³ J/万元 ^[20]	2.56
环境污染			8.27
化肥	2.15×10 ⁸ kg	2.65×10 ¹¹ J/kg	5.72
养殖污水	3.41×10 ⁶ m ³	7.49×10 ¹² J/m ³	2.56
水土流失	6.81×10 ⁷ kg	1.71×10 ⁹ J/kg	11.60
生态失衡			45.80
地表水	4.89×10 ¹⁴ J	1.12×10 ⁵ J/J	5.48
地下水	1.58×10 ¹⁵ J	2.55×10 ⁵ J/J	40.30
农业生产用水负效益			68.20

2011 年郑州市农业生产系统用水正效益为 1.62×10²¹J,负效益为 6.82×10²⁰J,负效益高达正效

益的 42.10%。农业用水负效益中,生态失衡负效益占比为 67%,是农业生产用水负效益的主要部分,这是由于用水过程中造成的水质污染在一定程度上损坏了河流的自净能力,使河水理化性质恶化,现代农业动植物品种更加单一,进一步加剧了生态多样性的破坏与丧失,进而造成严重的生态系统失调^[31]。水土流失负效益所占比例为 17%,说明郑州市农业生产资料投入量大且利用效率较低,浪费了大量能值资源。种植业与畜牧业生产造成的环境污染负效益所占比例为 12%,这是郑州市农业生产方式及产业结构不合理带来的弊端。虽然地下水超采部分所占比例仅为 4%,但地下水超采会引起地下水位的变化,其上升或下降会直接导致水土、水盐平衡失调,土壤质量下降,造成土地荒漠化、盐渍化、生态植被退化等严重问题^[5],因此不可轻视地下水超采问题。

3 结 语

从生态经济学的角度,采用能值分析方法对农业生产系统进行研究。在对系统能值投入与产出分析的基础上,通过能值指标体系建立起投入与产出的数量关系,以反映系统的经济效率,评价系统结构功能及运行状态;从生态角度入手,考虑了用水过程中引起的环境负效应,以能值作为统一的度量尺度,提出了农业生产系统用水正负效益的计算方法。将该方法应用于郑州市,计算得郑州市 2011 年农业生产系统用水正负效益分别为 1.62×10²¹J 和 6.82×10²⁰J,说明农业生产用水在取得正效益的同时,也会随之带来相当大程度的负效益。郑州市今后农业生产中应适当减少不可更新资源的投入并提高其利用效率,充分利用可更新资源。本文在计算时没有考虑地表水和地下水重复利用量,这样会使研究结果存在一定的偏差;在生物多样性减少损失能值中,只考虑野生动物的损失,因此本文方法有待进一步的完善。

参考文献:

[1] 罗良国,任爱胜,王瑞梅,等.我国农业可持续发展的水危机及广泛开展节水农业前景初探[J].节水灌溉,2000,6(5):6-9. (LUO Liangguo, REN Aisheng, WANG Ruimei, et al. An elementary study on water resource crisis and agricultural WS foreground for agriculture sustainable development in China[J]. Water Saving Irrigation, 2000, 6(5): 6-9. (in Chinese))

[2] 翟胜,王巨媛,张二勋,等.农业生态系统可持续性评价研究[J].地域研究与开发,2010,29(1):124-129. (ZHAI Sheng, WANG Juyuan, ZHANG Erxun, et al.

- Review on evaluation of sustainable agro-ecosystem [J]. Areal Research and Development, 2010, 29 (1): 124-129. (in Chinese))
- [3] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应 [J]. 土壤学报, 2006, 43 (5): 843-850. (ZHANG Taolin, LI Zhongpei, WANG Xingxiang. Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (5): 843-850. (in Chinese))
- [4] 徐恒力. 水资源开发与保护 [M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [5] 吕博, 倪娟, 王文科, 等. 水资源开发利用引起的环境负效应: 以玛纳斯河流域为例 [J]. 地球科学与环境学报, 2006 (9): 53-56. (LÜ Bo, NI Juan, WANG Wenke, et al. Negative environmental influence caused by development of water resource: a case study of Manasi River Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006 (9): 53-56. (in Chinese))
- [6] ODUM H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [7] 吴泽宁, 郭瑞丽, 胡彩虹. 基于生态环境损失的郑州市农业生态系统能值分析 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (5): 1-4. (WU Zening, GUO Ruili, HU Caihong. Emergy analysis of Zhengzhou agricultural ecosystem based on ecological environment loss [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (5): 1-4. (in Chinese))
- [8] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳, 等. 生态经济系统能值分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 167-174.
- [9] AHERN J E. The emergy method of emergy systems analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [10] ULGIATI S, Odum H T, BASTIANONI S. Energy analysis of the Italian agricultural system: the role of energy quality and environmental inputs [C] // Trends in Ecological Physical Chemistry. New York: Elsevier, 1992: 187-215.
- [11] 李成双, 傅小锋, 郑度. 中国经济发展水平的能值分析 [J]. 自然资源学报, 2001, 16 (4): 297-304. (LI Shuangcheng, FU Xiaofeng, ZHENG Du. Emergy analysis for evaluating sustainability of Chinese economy [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16 (4): 297-304. (in Chinese))
- [12] 李海涛, 严茂超, 沈文清, 等. 新疆生态经济系统的能值分析与可持续发展研究 [J]. 干旱区地理, 2001, 24 (4): 289-295. (LI Haitao, YAN Maochao, SHEN Wenqing, et al. Study on energy evaluation and sustainable development of ecological economic systems of Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2001, 24 (4): 289-295. (in Chinese))
- [13] 张耀辉. 农业生态系统能值分析方法 [J]. 中国生态农业学报, 2004, 12 (3): 181-183. (ZHANG Yaohui. Agroeco system emergy synthesis method [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12 (3): 181-183. (in Chinese))
- [14] 陆宏芳, 蓝盛芳, 陈飞鹏, 等. 农业生态系统能量分析 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (1): 159-162. (LU Hongfang, LAN Shengfang, CHEN Feipeng, et al. Advances in energy analysis of agro-ecosystems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15 (1): 159-162. (in Chinese))
- [15] 崔丽娟, 赵欣胜. 鄱阳湖湿地生态能值分析研究 [J]. 生态学报, 2004, 24 (7): 1480-1485. (CUI Lijuan, ZHAO Xinsheng. Researches on the emergy analysis of Poyanghu Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (7): 1480-1485. (in Chinese))
- [16] 张耀军, 成升魁, 闪庆文, 等. 资源型城市生态经济系统的能值分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13 (3): 218-222. (ZHANG Yaojun, CHENG Shengkui, SHAN Qingwen, et al. Emergy analysis of ecological economic system in resource based cities [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13 (3): 218-222. (in Chinese))
- [17] 陆宏芳, 蓝盛芳, 彭少麟. 系统可持续发展的能值评价指标的新拓展 [J]. 环境科学, 2003, 24 (3): 150-154. (LU Hongfang, LAN Shengfang, PENG Shaolin. Extending study on energy indices for sustainable development [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2003, 24 (3): 150-154. (in Chinese))
- [18] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [19] 陈丹, 陈菁, 关松, 等. 基于能值理论的区域水资源复合系统生态经济评价 [J]. 水利学报, 2008, 39 (12): 1384-1388. (CHEN Dan, CHEN Jing, GUAN Song, et al. Comprehensive evaluation of water resources-ecological economic complex system based on emergy theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (12): 1384-1388. (in Chinese))
- [20] 吕翠美, 吴泽宁. 区域用水效率与节水潜力的能值分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23 (2): 62-67. (LÜ Cuimei, WU Zening. Emergy analysis for water use efficiency and water saving potential [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23 (2): 62-67. (in Chinese))
- [21] 王嘉, 王植, 琚慧媛, 等. 农业生态系统能量分析方法研究进展 [J]. 沈阳大学学报, 2007, 19 (2): 78-82. (WANG Jia, WANG Zhi, JU Huiyuan, et al. Advances in energy analysis of agro-ecosystems [J]. Journal of Shenyang University, 2007, 19 (2): 78-82. (in Chinese))
- [22] 刘迪, 胡彩虹, 吴泽宁. 基于定额定量分析的农业用水需求预测研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27 (9): 88-91. (LIU Di, HU Caihong, WU Zening. Predicting method for demand of agriculture water based on quantitative analysis [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27 (9): 88-91. (in Chinese))

(下转第 52 页)

- [13] 高玉峰,王庶懋,王伟. 动荷载下砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土变形特性的试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(9):1773-1778. (GAO Yufeng, WANG Shumao, WANG Wei. Test study on deformation characteristics of lightweight sand-EPS beads soil under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(9):1773-1778. (in Chinese))
- [14] 黎冰,高玉峰. 黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(7):1042-1047. (LI Bing, GAO Yufeng. Experimental study on dynamic deformation characteristics of lightweight clay-EPS beads soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(7):1042-1047. (in Chinese))
- [15] 王庶懋,高玉峰. 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土 (LSES) 细观结构的 CT 研究[J]. 岩土力学,2006,27(12):2137-2142. (WANG Shumao, GAO Yufeng. Research on meso-structure of lightweight sand-EPS bead soil (LSES) using CT [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(12):2137-2142. (in Chinese))
- [16] 辛凌,沈扬,刘汉龙,等. 单轴压力下 RST 轻质土变形特性及其细观机理分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(2):160-164. (XIN Ling, SHEN Yang, LIU Hanlong, et al. Deformation behavior and its meso-mechanism analysis of lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires based on unconfined compressive test [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010,38(2):160-164. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-14 编辑:熊水斌)

(上接第 5 页)

- [23] 李小凯,石海峰. 地下水超采的经济损失计算方法及其在典型地区的应用[J]. 水利水电科技进展,2003,23(6):13-16. (LI Xiaokai, SHI Haifeng. Calculation method for economic loss caused by over mining of groundwater and its application to typical regions [J]. Advances In Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(6):13-16. (in Chinese))
- [24] 郑州大学. 郑州市水文水资源调查评价报告[R]. 郑州:郑州大学,2006.
- [25] 洪宝鑫,瞿益民. 旱作物利用雨水量的试验分析[J]. 节水灌溉,2001,22(1):22-24. (HONG Baoxin, QU Yimin. Drought plants use experimental analysis of rain water [J]. Water Saving Irrigation, 2001, 22(1):22-24. (in Chinese))
- [26] 尚清芳. 干旱区绿洲农业生态经济系统能值分析[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [27] 张鑫. “四位一体”农业生态系统能流与能值分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2007.
- [28] 雷宏军,刘鑫,徐建新. 郑州市水资源可持续利用的模糊综合评价[J]. 灌溉排水学报,2008,27(2):77-81. (LEI Hongjun, LIU Xin, XU Jianxin. Integrated assessment of the sustainable utilization of water resources in Zhengzhou City based on a modified fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(2):77-81. (in Chinese))
- [29] 樊津江,何颖,杨蕾. 郑州市水土流失原因及防治措施[J]. 河南科学,2002,20(3):328-330. (FAN Jinjiang, HE Ying, YANG Lei, et al. Cause and prevention measure of soil and water loss on Zhengzhou City [J]. Henan Science,2002,20(3):328-330. (in Chinese))
- [30] 童绍玉. 浅析现代农业对生态环境的影响[J]. 楚雄师范学院学报,2003,18(3):75-83. (TONG Shaoyu. A brief analysis of the influences of modern agriculture on ecotope [J]. Journal of Chuxiong Normal University,2003,18(3):75-83. (in Chinese))
- [31] 赵永国. 关中平原水资源开发利用的环境负效及其对策[J]. 干旱区资源与环境,1989,8(5):59-66. (ZHAO Yongguo. Negative environmental effects and their counter measures of water resources exploitation and utilization in Guangzhou Plain [J]. Journal of Arid Land Resources & Environment,1989,8(5):59-66. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-30 编辑:郑孝宇)

(上接第 46 页)

- [14] 李阳袁,朱盛胜. 疏浚泥固化工程预制品的研制与示范应用[J]. 混凝土与水泥制品,2014(5):38-41. (LI Yangyuan, ZHU Shengsheng. Study and application of hardening engineering of dredged mud [J]. China Concrete and Cement Products,2014(5):38-41. (in Chinese))
- [15] 赵含梅,赵仲辉,胡孝彭,等. 固化淤泥持水特性试验[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):57-61. (ZHAO Hanmei, ZHAO Zhonghui, HU Xiaopeng, et al. Experimental study on water retention characteristics of solidified dredged materials [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(1):57-61. (in Chinese))
- [16] 吴红,廖德华,孔德顺,等. 不同激发剂对煤矸石基免烧砖性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2012,31(1):221-225. (WU Hong, LIAO Dehua, KONG Deshun, et al. Effect of different activators on properties of gangue based unfired brick [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2012,31:221-225. (in Chinese))
- [17] 赵永巧. 浅谈土壤固化剂的发展与固化机理研究[J]. 水利科技与经济,2005,11(10):620-624. (ZHAO Yongqiao. Introduction to the development of solidifier and the investigation of solidification mechanism [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2012,31:221-225. (In Chinese))

(收稿日期:2015-07-07 编辑:郑孝宇)