

西部中小城市再生水项目投资效率研究

高旭阔, 薛佳丽

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: [目的] 分析影响再生水投资效率的各项因素, 为全面评价西部中小城市再生水项目投资效率提供理论基础。[方法] 以陕西省渭南市为例, 运用系统动力学方法, 通过计算机仿真模拟渭南市 2005—2014 年的污水处理率、污水处理投资总额、污水处理项目总产出等因素的变化趋势, 并在总产出中考虑再生水项目的外部效果来比较投资效率的变化。[结果] 渭南市近 10 a 来污水处理率逐年提高, 传统评价方法得出投资效率呈递减趋势, 而考虑外部效果的投资效率逐年递增。[结论] 考虑再生水项目外部效果的评价方法可以全面、综合地研究再生水项目的投资效率, 为再生水项目的建设提供决策支持。

关键词: 西部中小城市; 再生水; 系统动力学; 投资效率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)02-0142-06

中图分类号: TV213.9, X703

文献参数: 高旭阔, 薛佳丽. 西部中小城市再生水项目投资效率研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 142-147. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.021; Gao Xukuo, Xue Jiali. Investment Efficiency of Reclaimed Water Projects in Small and Medium Cities in Western China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 142-147. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.021

Investment Efficiency of Reclaimed Water Projects in Small and Medium Cities in Western China

GAO Xukuo, XUE Jiali

(School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to analyze the factors that affect the investment efficiency of recycled water, and to provide a theoretical basis for the comprehensive evaluating investment efficiency of the reclaimed water projects in small and medium cities in Western China. [Methods] Using the method of system dynamics, the study worked out a computer simulation of 2005—2014 in Weinan City of Shaanxi Province and illustrated the change of investment efficiency of the total output in the reclaimed water project in consideration of the external additional effect. The simulated data included the processing factors of sewage treatment rate, total amount of investment, and the project output, etc. [Results] The sewage treatment rate in Weinan City had increased gradually, but the traditional evaluation method showed a decreasing trend of the investment efficiency. The study indicated that if the external effect was considered, the evaluation of investment efficiency considering was in accordance with the actual trend of increasing. [Conclusion] On the condition of considering the external effect, the evaluation method of the reclaimed water project was comprehensive and can provide decision support for the construction of the reclaimed water project.

Keywords: small and medium-sized cities in Western China; reclaimed water projects; system dynamics; investment efficiency

我国水资源分布空间差异较大,西北部地区人口比例为全国的 46%,而水资源总量只占全国的 19%。

为缓解水资源紧张的状况,城市污水经过处理后再生回用日渐受到人们的关注。在西部及北方主要缺水

收稿日期: 2016-06-08

修回日期: 2016-09-02

资助项目: 国家社会科学基金项目“考虑环境成本与收益的再生水项目投资经济分析研究”(15BGL140)

第一作者: 高旭阔(1973—),男(汉族),陕西省西安市人,博士,教授,主要从事资源与环境经济分析、环境管理和经济评价方面的教学科研工作。E-mail: gao_xk@163.com。

通讯作者: 薛佳丽(1992—),女(汉族),山西省霍州市人,硕士研究生,研究方向为城市建设与房地产经济与管理。E-mail: xuejl0313@163.com。

城市中,北京、天津等大城市再生水回用项目得到一定程度的应用,产生了良好的社会、经济效果^[1]。但在许多中小城市却并不理想。目前我国中小城市污水处理基本上以政府投资为主,一方面,资金投入不能与污水处理量的增幅相适应^[2];另一方面投入运行的污水处理厂负荷不足,产生了资源浪费,究其原因主要是污水处理厂规模设计不合理,配套管网、污水厂运营管理等显著滞后于污水处理厂的建设与发展^[3]。至于污水处理后的污泥处理和再生水回用更不理想,41.18%的中小城市污水处理厂直接将含水率达 80%的污泥卫生填埋,只有少数采用焚烧、堆肥的处理方式,有 76.67%的污水处理厂再生水回用量为零^[4]。种种现象表明,中小城市的再生水(污水处理)项目的投资效率不容乐观。本研究基于系统动力学方法,以渭南市再生水项目的投资效率为研究对象,模拟仿真其投资效率的动态变化,以期为解决西部地区中小城市再生水项目投资短缺,效率低等问题提供借鉴和参考。

1 研究方法 with 模型构建

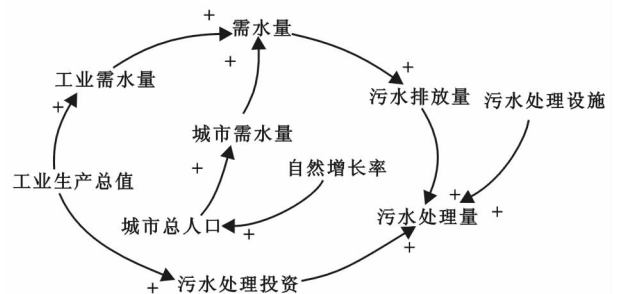
1.1 理论概述

经济学意义上的投资效率,通常是指在投资活动中投入与产出之间的对比关系。再生水项目作为市政基础设施之一,具有与其他基础设施相同的公益性、社会性、投资额大、建设周期长的特点,长期以来都是政府投融资建设的对象。对于再生水回用这类政府主导建设的项目而言,投资效率是政府在投资活动中所取得的有效成果与消耗或者占用的投入额之间的比率^[5]。其核心是政府城市基础设施建设投资的资金使用效率和资源的配置效率。系统动力学(system dynamics, SD)是一种研究复杂系统行为的方法,适于研究随时间变化的复杂系统问题,最初由麻省理工学院福瑞斯特^[6]于 1956 年创立。系统动力学模型是一种因果机理性模型,它强调系统行为主要是由系统内部的机制决定的;擅长处理高阶次、非线性、长期性和周期性的复杂题;在数据不足及某些参量难以量化时,以反馈环为基础依然可以做一些研究。由于系统动力学在研究复杂的非线性系统方面具有无可比拟的优势,已经广泛应用于社会、经济、管理、资源环境等诸多领域。系统动力学广泛应用于效率的研究,如李旋旗等^[7]用系统动力学方法构建了住区形态变迁对城市代谢效率影响的系统动力学模型,研究发现交通效率与住房效率的下滑是最主要的原因。俞海宏等^[8]运用系统动力学的研究方法,构建了港口群效率的系统动力学模型并进行仿真分析。Lin

等^[9]针对医院服务系统运行效率的优化问题,考虑手术流程中医疗资源的不同配置,建立了多目标仿真模型,计算得到最短等待时间和服务时间。陈光宇,王惟贤等^[10]将考虑资源约束及其产出的改进 DEA 算法与系统动力学仿真模型相结合,提出了大科学工程项目效率动态评价方法。系统动力学方法是一种目标导向的仿真方法,可以考虑到所有影响因素而对复杂系统进行建模。通过因果反馈图进行定性分析,然后确定不同要素之间的影响关系,建立项目效率的量化模型,通过建立模型考虑到诸多因素的影响对效率进行仿真。因此,可以通过系统动力学方法来研究项目的投资效率。

1.2 再生水项目投资效率系统动力学模型的构建

1.2.1 系统因果关系图 因果关系是剖析系统各变量间的相互关系,它是系统动力学建模的基础,是对系统内部结构关系的定性描述。通过建立因果关系图,可以直观地反馈系统结构的框架。本文在对污水处理行业调查的基础上,根据需水量、污水处理量和污水处理投资 3 个主要因素之间的因果反馈关系构建再生水项目动态投资运行模型(图 1)。



注：“+”表示正反馈关系；“-”表示负反馈关系。

图 1 城市再生水项目因果关系

1.2.2 系统模型方程 在因果关系图的基础上,运用 Vensim 软件,从再生水项目的污水处理率、污水治理投资总额和污水处理项目收益 3 方面,根据系统运行的状态、速率变量、辅助变量、方程等构建再生水项目投资效率系统动力学模型,模型中主要方程如下:

1.2.2.1 污水排放总量相关方程

(1) 排污水平增加量 =

城市生活污水排放量系数 × 排污水平增加率

(2) 城市生活污水排放量系数 = INTEG(排污水平增加量, 0.9)

(3) 人口增长数 = 城市总人口 × 自然增长率

(4) 城市总人口 = INTEG(人口增长数, 531.36)

(5) 城市生活需水量 = 城市总人口 × 150 × 365 × 0.001

(6) 城市生活污水排放量 = 城市生活污水排放量系数 × 城市生活需水量

(7) 工业生产总价值增长值 = 工业生产总价值 × 工业生产总价值增长率

(8) 工业生产总价值 = INTEG(工业生产总价值增长值, 388728)

(9) 工业用水总量 = 工业生产总价值 × 0.015

(10) 工业污水排放量 = 工业污水排放量系数 × 工业用水总量

(11) 污水排放总量 = 城市生活污水排放量 + 工业污水排放量

1.2.2.2 污水处理率相关方程

(1) 处理设施增长量 = 污水治理设施数 × 设施增长率

(2) 污水治理设施数 = INTEG(处理设施增长量, 100)

(3) 污水处理总量 = 污水治理设施数 × 0.25 × 365

(4) 污水处理率 = 污水处理总量 / 污水排放总量

1.2.2.3 污水处理项目总产出相关方程

(1) 人均支付意愿增加值 = 人均支付意愿 × 人均支付意愿增加率

(2) 人均支付意愿 = INTEG(人均支付意愿增加值, 0.3)

(3) 环境效益 = 人均支付意愿 × 污水处理总量

(4) 污水处理经济贡献增加值 = 污水处理经济贡献值 × 污水处理经济贡献增加率

(5) 污水处理经济贡献值 = INTEG(污水处理经济贡献增加值, 8)

(6) 社会效益 = 污水处理总量 × 污水处理经济贡献值 × 0.1

(7) 排污费增加值 = 排污费 × 排污费增加率

(8) 经济效益 = 排污费 =

INTEG(排污费增加值, 3 959.96)

(9) 污水处理项目总产出 = 经济效益 + 环境效益 + 社会效益

1.2.2.4 投资效率相关方程

(1) 城市污水处理投资增加值 = 城市生活污水基础设施投资 × 城市污水处理投资增加率

(2) 城市生活污水处理基础设施投资 = INTEG(城市污水处理投资增加值, 10 297.4)

(3) 工业污水治理运行费用增加值 = 工业污水治理设施运行费用 × 工业污水治理运行费用增加率

(4) 工业污水治理设施运行费用 = INTEG(工业污水治理运行费用增加值, 9 189.72)

(5) 污水治理投资总额 = 城市生活污水处理基础设施投资 + 工业污水治理设施运行费用

(6) 投资效率 1 = 经济效益 / 污水治理投资总额

(7) 投资效率 2 = 污水处理项目总产出 / 污水治理投资总额

1.3 模型检验

1.3.1 数据来源 渭南市辖 2 区两市 8 县, 地处陕西关中东部, 是陕西省重要的工农业基地。渭南市水资源总量不足^[11], 人均单位面积平均水资源占有量分别为 6 075 和 3 570 m³/hm², 排列陕西 10 个地(市)第 9 位; 分别为全省平均水平的 1/3, 1/4 略高, 其人均水资源水平几乎相当美国 1975 年人均实际用水水平 3.79 × 10⁴ m³/hm² 的 11%, 属于我国西部地区典型的中小型缺水城市。本研究以渭南市为例进行模拟仿真, 模型中采用的数据均来自《陕西统计年鉴》等, 模型中参数的设置是根据系统模型方程中各变量之间的关系, 根据 2005 年以来的相关数据, 运用平均增长法、统计分析法等分析拟合而得, 各流速变量的初始值选取 2005 年的数值(表 1)。

表 1 主要变量的初始值

变量	初始值	变量	初始值
人口自然增长率/%	0.3	城市生活污水排放量系数	0.9
城市总人口/万人	531.36	工业污水排放量系数	0.013
工业生产总价值/万元	388 728	投资增加率/%	21
工业生产总价值增长率/%	20	城市生活污水处理基础设施投资/万元	10 297.4
设施增长率/%	13	工业污水治理设施运行费用/万元	9 189.72
污水治理设施数/套	100	运行费用增加率/%	7.5

1.3.2 模型的有效性检验 模型的有效性检验是将模型的仿真结果与实际情况进行比较, 即比较系统行为和历史数据的拟合程度, 并在此基础上反复修改更正模型, 以保证模型的有效性。对渭南市再生水投资

效率模型中的工业污水治理设施运行费用、城市总人口、城市生活污水处理基础设施投资这 3 个主要变量 2005—2014 年的仿真结果与实际数据相比较(表 2)。从表 2 可以看出, 仿真值与统计值的相对误差均小于

10%,相对误差大于5%的值有6个,占总统计数值的20%,考虑到社会政策的变动,生活水平的提高等因

素,可以认为所构建的模型具有较好的有效性和模拟性。

表 2 渭南市再生水投资效率模型历史性检验

年份	工业污水治理设施运行费/万元			城市总人口/万人			城市生活污水处理基础设施投资/万元		
	仿真值	统计值	误差/%	仿真值	统计值	误差/%	仿真值	统计值	误差/%
2005	9 190	9 190	0.00	531.36	531.36	0.00	10 297	10 297	0.00
2006	9 879	9 413	-4.95	532.95	532.66	-0.06	12 460	12 208	-2.06
2007	10 620	9 780	-8.59	534.55	533.95	-0.11	15 077	14 597	-3.28
2008	11 416	10 915	-4.59	536.15	535.39	-0.14	18 243	19 220	5.09
2009	12 273	11 690	-4.98	537.76	536.69	-0.20	22 074	23 014	4.09
2010	13 193	12 360	-6.74	539.37	537.84	-0.29	26 709	25 656	-4.10
2011	14 183	13 759	-3.08	540.99	538.99	-0.37	32 318	35 582	9.17
2012	15 246	14 034	-8.64	542.61	540.43	-0.40	39 105	37 078	-5.46
2013	16 390	17 031	3.77	544.24	542.01	-0.41	47 317	43 943	-7.68
2014	17 619	17 310	-1.78	545.88	543.60	-0.42	57 253	55 378	-3.38

注:相对误差=(统计值-仿真值)/统计值。

2 结果与分析

2.1 仿真结果分析

根据本文的研究目的,运用系统动力学仿真软件 Vensim 对模型中的污水排放量、污水处理总量、污水处理率、污水处理投资效率等主要变量进行仿真模拟,仿真时间为 2005—2014 年,仿真步距为 1 a,初始仿真时间和各流速变量的初始值均选取 2005 年的数值,模拟运行结果详见表 3。

表 2—3 的仿真结果显示,渭南市近年来城市总人口平均增长率为 0.3%,增长趋势缓慢,随着近年来城市化进程的加快,人民生活水平提高,居民排污水平也相应的有所提高,使得城市生活污水排放量呈递

增趋势,从 2005 年的 2.62×10^8 t 增长到 2014 年的 2.81×10^8 t;2005—2014 年渭南市工业生产总产值的平均增长率为 20%,工业用水总量随之显著增长,而经过统计工业用水重复利用率基本保持在 85%左右,因此污水处理总量呈刚性递增趋势,到 2014 年增长到 4.51×10^7 t;由于污水治理设施逐年增加以及污水处理技术不断改进,污水处理总量也在逐年上升,到 2014 年达到 2.74×10^8 t;随着污水处理能力的上升,污水处理率也呈递增趋势,到 2014 年污水处理率达到 83.97%;污水治理投资总额也在不断增长,从 2010 年开始增长趋势加快,2014 年污水治理投资总额较 2005 年相比,增长了近 4 倍,而污水处理的投资效率很低,并且呈递减趋势。

表 3 渭南市再生水投资效率模型主要变量模拟仿真结果

年份	城镇生活污水排放量/ 10^4 t	工业污水排放量/ 10^4 t	污水处理总量/ 10^4 t	污水处理率/%	污水治理投资总额/ 10^4 元	投资效率 1
2005	26 182.8	874.64	9 125.0	33.72	19 487.2	0.203 209
2006	26 392.6	1 049.57	10 311.3	37.57	22 338.9	0.193 009
2007	26 604.2	1 259.48	11 651.7	41.82	25 696.4	0.182 911
2008	26 817.4	1 511.37	13 166.4	46.48	29 658.9	0.172 957
2009	27 032.3	1 813.65	14 878.1	51.58	34 346.1	0.163 188
2010	27 249.0	2 176.38	16 812.2	57.14	39 901.9	0.153 642
2011	27 467.4	2 611.65	18 997.8	63.16	46 500.3	0.144 354
2012	27 687.5	3 133.99	21 467.5	69.65	54 350.7	0.135 353
2013	27 909.5	3 760.78	24 258.3	76.60	63 706.1	0.126 665
2014	28 133.2	4 512.94	27 411.9	83.97	74 871.8	0.118 312

污水排放总量取决于工业污水排放量和城市生活污水排放量这 2 个变量,污水处理率取决于污水排放总量和污水处理总量。综合表 3 的仿真结果,可以

发现渭南市污水处理率上升,但投资效率降低的主要原因有:(1)城市总人口和工业总产值的不断增长使得城市需水量逐年递增,这种刚性需求的增长使得污

水排放总量呈递增趋势,随着污水排放总量的递增以及对环保问题的重视,大大增加了污水处理的需求。

(2) 污水处理设施的增加以及处理技术的进步,使得污水处理能力稳步上升;工业污水排放量的增加速率虽然较快,但仅占总污水排放量的 15% 左右,污水排放量主要还是由城市生活污水排放量决定,而考虑居民排水水平提高后的城市生活污水排放量的增加速率为 0.8%,远小于污水处理能力的增加速率,从而使得污水处理率逐年上升。(3) 近年来,对污水排放问题越来越重视,各大政策相继出台,政府对污水处理水质的监管也越来越严格,使得污水治理投资大幅增长,污水治理投资总额的增加使得污水处理总量呈递增趋势,从而提高了污水处理率。由于再生水项目的特殊性决定了它不以营利为目的,项目的主要经济收入仅为征收的排污费,仅以该指标作为项目的产出来评价再生水项目的投资效率,得出项目的投资效率很低,并呈现逐年递减的趋势。

2.2 考虑外部效果的再生水项目投资效率研究

前文提到,对于再生水回用这类政府主导建设的项目而言,投资效率是政府在投资活动中所取得的有效成果与消耗或者占用的投入额之间的比率。投资效率传统评价方法仅考虑项目经济效益,考虑到再生水项目的特殊性,在产出中考虑项目的外部效果,则再生水项目的产出应该包括经济效益、环境效益和社会效益 3 部分。为进一步研究再生水项目的投资效率,对再生水项目的投资效率进行两种情景下的仿真模拟,并通过比较仿真结果来比较两种评价结果。其中,情景 1 表示模型各初始参数值不变,再生水项目的产出仅考虑项目的经济效益,经济效益以项目收取的排污费来量化;情景 2 中再生水项目的产出包括经济效益、环境效益和社会效益,参照文献[12]中对西安市再生水外部效果的量化结果,对环境效益以居民愿意使用再生水的人均支付意愿来量化,社会效益以每单位再生水所创造的国内生产总值来量化,项目外部效果初始值选取 2005 年的数值,主要参数详见表 4。

表 4 再生水项目外部效果参数取值

变量	初始值
排污费/万元	3 959.96
排污费增加率/%	10.00
人均支付意愿/(元·m ⁻³)	0.30
人居支付意愿增加率/%	18.50
污水处理经济贡献/(元·m ⁻³)	8.00
污水处理经济贡献增加率/%	10.00

从表 5 可以看出,随着污水排放量的增加,以及渭南市政府对污水排放水质监测的加强,征收的排污

费逐年上涨,反映了再生水项目的经济效益是逐年递增的;再生水项目的环境效益体现在人们对再生水可持续利用的意愿、污水处理后对水资源的改善等方面,随着近年来人们环保意识的提升和对再生水资源的认识,政府大力倡导污水的再生利用,人们对再生水的支付意愿也逐年增长,再生水项目的环境效益也逐年增加;近年在政府的主导下,再生水项目的建设逐渐增多,给很多居民增加了就业机会,并且再生水回用后替代水资源在国民生产总值中发挥着部分作用,其产生的社会效益也是逐年递增的。

表 5 考虑外部效果的再生水项目投资效率仿真结果 万元

年份	经济效益	环境效益	社会效益	投资效率 2
2005	3 959.96	2 738	7 300	0.718 293
2006	4 355.95	3 666	9 074	0.765 283
2007	4 791.55	4 908	11 279	0.816 417
2008	5 270.70	6 573	14 020	0.872 018
2009	5 797.77	8 801	17 426	0.932 434
2010	6 377.55	11 785	21 661	0.998 044
2011	7 015.31	15 781	26 925	1.069 260
2012	7 716.84	21 132	33 467	1.146 550
2013	8 488.52	28 296	41 600	1.230 410
2014	9 337.37	37 890	51 709	1.321 410

对图 2 中 2 种情景下的再生水项目投资效率比较,可以发现,投资效率 2 的值远高于投资效率 1,并且投资效率 1 呈递减趋势,而投资效率 2 呈递增趋势,由此说明,在项目的产出中加入环境效益和社会效益因素后,再生水项目的投资效率显著提高,在 2010 年以后,渭南市再生水项目的投资效率大于 1,表明项目的产出大于投入,再生水项目外部效果发挥的作用越来越显著。

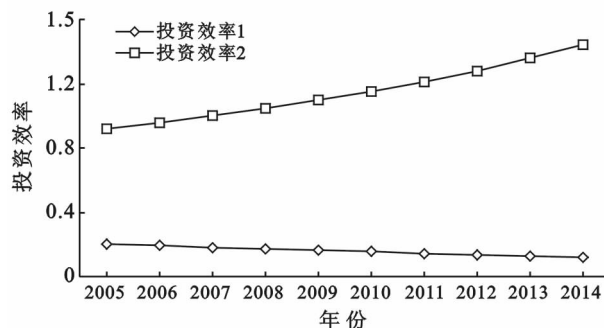


图 2 不同情景下的投资效率

3 讨论与结论

(1) 对渭南市 2005—2014 年的投资效率仿真分析发现,由于城市人口和工业生产总值的增长,城市的污水排放总量也逐年增加;随着近年来对环保问题

的重视,污水治理投资总额以及污水处理设施处理能力大幅增长,其增加速率远高于污水排放总量的增加速率,从而污水处理效率相应提高;

(2)传统的投资效率评价方法不考虑系统的外部效果,得出的结论表明再生水项目的投资效率逐年降低,资金不愿进入,不利于污水再生利用;而考虑外部效果的评价方法,能够更加全面、综合的分析再生水项目的投资效率,得出的结论表明再生水项目的投资效率逐年增加。因此对于再生水项目的投资与建设应该综合考虑其经济效益、环境效益和社会效益,全面分析投入与产出之间的关系,这样更有利于得到政府的支持。

(3)受统计数据和假设条件的限制,本文所建立的系统动力学模型主要考虑了城市生活和工业产生的污水量,考虑的影响因素并不全面,没有考虑农业、第三产业等所产生的污水量,在考虑环境效益和社会效益时只量化了其中的一部分,没有全面的反应再生水项目的外部效果,这正是下一阶段的主要研究工作。

[参 考 文 献]

- [1] 李燕群,何通国,刘刚,等.城市再生水回用现状及利用前景[J].资源开发与市场,2011,27(12):1096-1100.
- [2] 范丽娟,宋晓晖,范云照.浅议污水处理厂运行成本的分

析与管理[J].科技创新与应用,2015(32):274.

- [3] 杨勇,王玉明.我国城镇污水处理厂及运行现状分析[J].给水排水,2011,37(8):35-39.
- [4] 朱向东.中小城市如何避免“水患”.中国建设报[EB/OL],[2012-07-05](2015-03-06).<http://www.zchb.net/news/view?id=72>.
- [5] 郑磊.城市基础设施投资效率问题和对策研究[J].现代商贸工业,2008(12):84-85.
- [6] Forrester Jay W. Industrial Dynamics [M]. US: Pegasus Communications,1961.
- [7] 李旋旗,花利忠.基于系统动力学的城市住区形态变迁对城市代谢效率的影响[J].生态学报,2012,32(10):2965-2974.
- [8] 俞海宏,刘南.基于系统动力学的长三角港口群效率模型研究[J].中国航海,2012,35(1):98-104.
- [9] Lin R C, Mustafa Y S, Kalysan S P. Multi-objective simulation optimization using data envelopment analysis and genetic algorithm: Specific application to determining optimal resource levels in surgical services [J]. Omega, 2013,41(5):881-892.
- [10] 陈光宇,王惟贤,邵云飞,等.大科学工程项目效率动态建模方法[J].技术经济,2015,12(12):93-100.
- [11] 孔晓.渭南市水资源开发利用现状及对策研究[J].地下水,2011,33(2):34-35.
- [12] 高旭阔.城市再生水价值评价研究[D].陕西西安:西安建筑科技大学,2010.

(上接第141页)

- [12] 郑光辉,王明江,焦彩霞,等.土壤有机质高光谱估算研究进展[J].南京信息工程大学学报,2013,5(6):481-486.
- [13] 史舟,王乾龙,彭杰,等.中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型[J].中国科学(D):地球科学,2014,44(5):978-988.
- [14] 马创,申广荣,王紫君,等.不同粒径土壤的光谱特征差异分析[J].土壤通报,2015,46(2):292-298.
- [15] 张娜,张栋良,李立新,等.基于高光谱的区域土壤质地预测模型建立与评价:以河套灌区解放闸灌域为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(5):67-72.
- [16] Martin P D, Malley D F, Manning G, et al. Determination of soil organic carbon and nitrogen at the field level using near-infrared spectroscopy [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2002,82(4):413-422.
- [17] Luce M S, Ziadi N, Zebarth B J, et al. Rapid determination of soil organic matter quality indicators using

visible near infrared reflectance spectroscopy [J]. Geoderma, 2014,232:449-458.

- [18] Lin Chen, Ma Ronghua, Zhu Qing, et al. Using hyper-spectral indices to detect soil phosphorus concentration for various land use patterns [J]. Environ. Monit. Assess, 2015,187(1):4130-4140.
- [19] 徐丽华,谢德体,魏朝富,等.紫色土土壤全氮和全磷含量的高光谱遥感预测[J].光谱学与光谱分析,2013,33(3):723-727.
- [20] USEPA. PLOAD 3.0 User's Manual [R]. January, 2001.
- [21] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [22] 杨才敏.土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J].水土保持研究,2008,15(5):177-179.
- [23] 陈书琴,储昭升,胡社荣,等.巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性[J].环境科学,2012,33(9):3031-3037.