



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2016.02.013

崔亮, 李永平, 黄国和, 等. 漳卫南灌区农业水资源优化配置研究[J]. 2016, 14(2): 70-74, 135.

CUI Liang, LI Yong pin, HUANG Guo he, et al. Optimization of agricultural water resources in Zhangweinan River Irrigation Area[J]. 2016, 14(2): 70-74, 135. (in Chinese)

漳卫南灌区农业水资源优化配置研究

崔亮¹, 李永平², 黄国和², 曾雪婷²

(1. 山西财经大学 环境经济学院, 太原 030006; 2. 华北电力大学 资源与环境研究院, 北京 102206)

摘要: 考虑到不确定条件下漳卫南灌区农业水资源管理的复杂性, 为了解决当灌区水资源用户供水目标不能满足需求时的水资源优化配置问题, 结合 LFP 模型与 TSP 模型的优点, 开发了一种分式两阶段随机规划模型(FTSP)。选择漳卫南灌区最大控制性工程岳城水库的两个大型供水灌区作为验证实例, 模型应用结果表明, 不同决策情景所对应的经济效益和缺水风险不同, 最优决策实现了经济效益和缺水风险之间的平衡; 不同径流水平下, 各用户的正常灌溉面积会发生相应变化, 高径流水平时所有用户均能得到正常灌溉。

关键词: 漳卫南灌区; 水资源管理; 不确定性; 分式两阶段随机规划

中图分类号: TV21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0070-05

Optimization of agricultural water resources in Zhangweinan River Irrigation Area

CUI Liang¹, LI Yong pin², HUANG Guo he², ZENG Xue ting²

(1. College of Environmental Economic, Shanxi University of Finance & Economics, Taiyuan 030006, China;

2. Institute of Resource and Environment, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The study developed a linear fractional two stage programming (FTSP) model for agricultural water management and programming in the Zhangweinan River Irrigation Area, China. The developed model incorporated the approaches of two stage stochastic programming (TSP) and linear fractional programming (LFP) within a general optimization framework, and these uncertainties expressed as both fractional and probability distributions can be addressed. Moreover, the model can reflect tradeoffs between conflicting economic benefits and the associated penalties attributed to the violation of irrigation targets. The results demonstrated that different pre regulating irrigation target policies lead to different system benefit and target violation risk and our optimized scenario balanced the system benefit and irrigation target violating risk; water allocation rate of the two channels are different under different scenarios, and all the fifteen subareas received allocated water flow under high inflow level.

Key words: Zhangweinan River Irrigation Area; water resources management; uncertainty; fractional programming

近年来,受经济发展和人口膨胀、气候变化和环境恶化等因素影响,水资源供需矛盾加剧,流域水资源管理面临着巨大的压力和挑战^[1-2]。水资源系统中存在着大量的不确定性^[3],这些不确定性主要是由

于水资源系统的复杂性、系统组分和过程的随机性以及人类认识的不足造成的^[4]。传统的水资源管理模型面对这些固有的不确定性问题,通常采用简化方法加以处理,使得规划模型失败的风险势必增加^[5]。

收稿日期: 2015-03-22 修回日期: 2015-12-23 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1502.028.html>

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51225904); 国家自然科学基金(51190095); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014XS68)

Fund: National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholar(51225904); National Natural Sciences Foundation of China(51190095); Program for Innovative Research Team in University(2014XS68)

作者简介: 崔亮(1985-),男,河北秦皇岛人,博士研究生,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: cui-liang852@126.com

目前,有很多学者对水资源管理中的复杂性和不确定性开发了一系列模型。TSP模型(Two-Stage Stochastic Programming)是一种可以解决期望目标得不到满足时有效进行后续追索及补偿的规划方法。TSP的具体思想是在一个随机事件发生之前先制定一个方案,当随机事件发生后,依据第一阶段预先制定的方案对随机事件产生的结果制定第二阶段的方案,以期最小化各种不可行性的惩罚^[6]。近年来TSP模型在水资源管理中得到了广泛的应用^[7-11]。Mobasher和Harboe将TSP用于水库多目标水资源管理优化^[12];Wang和Adams提出了一种不确定环境下的水库优化调度TSP模型,将入库水量的不确定性和季节变化看作是周期性马可夫过程^[13];Pereira和Pinto提出了多库水电站系统的随机优化方法^[14],之后他们又提出了一种求解多阶优化的方法并运用于水库优化调度案例研究^[15]。然而在水资源管理中,单位水量效益最大的问题普遍存在,该类问题可以概括为线性分式规划^[16]。线性分式规划模型(Liner Fractional Programming, LFP)是一种有效的实现系统边界效益最优的方法。LFP模型可有效处理的目标函数中如效益/总量、产出/输入等均为分式形式的规划问题^[17]。

本研究基于TSP模型和LFP模型开发了一种分式两阶段随机规划模型(An linear fractional two stage programming, FTSP)用于漳卫南流域内最大的控制性工程岳城水库两个大型供水灌区——漳南灌区和民有灌区,探究灌区农业灌溉水资源的优化配置问题。

1 研究区概况

漳卫南流域位于112°-118°E、35°-39°N,是中国北方重要的粮食、棉花生产基地。漳卫南流域干流漳卫南运河发源于太行山区,流域面积37700 km²。流域位于半干旱半湿润温带季风气候区,年平均气温约14℃,年平均降水量约608.4 mm。岳城水库是流域内一座以防洪为主的大型水利工程,位于河南省安阳县与河北省邯郸市磁县交界处,总库容13亿m³,主要通过漳南渠、民有渠和专用管道向河南省安阳市和河北省邯郸市供水其中漳南渠灌区灌溉面积为427万hm²,涉及河南省安阳市郊区、内黄县、安阳县及河北省临漳县;民有渠灌区灌溉面积为847万hm²,涉及磁县、临漳、肥乡、魏县、广平、曲周、成安、大名、等8个县^[18]。本文选取民有、漳南两大灌区为研究对象,根据两大灌区内的行政区划,共分为15个区域:肥乡县、磁县、大名县、广平县、曲周县、成安县、魏县、临漳县、文峰区、北关区、龙安区、

殷都区、安阳县、内黄县、开发区见图1,每个区域地表水灌溉的作物主要为玉米、小麦和棉花3种。

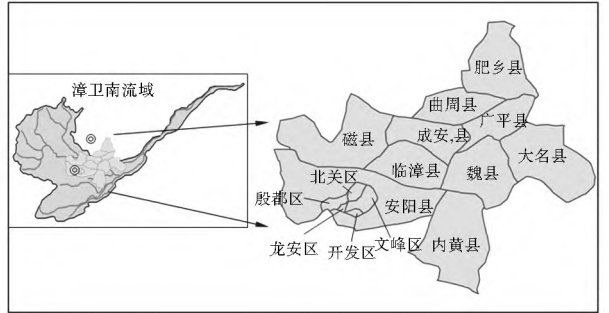


图1 研究区位置图

Fig. 1 Map of study area

岳城水库供水灌区面临的主要问题除天然水资源短缺以外,还存在以下问题:灌区内机井超采地下水严重,出现多处地下水位漏斗;岳城水库的入库水量逐年减少;随着可用水量的减少和用水结构变化,运用了20多年的岳城水库现有水资源管理方案已不适应研究区经济社会发展的需要。

2 数据资料与研究方法

2.1 数据获取

本研究收集的数据源主要来自漳卫南运河管理局规划设计研究院编写的《漳卫南运河水资源水环境综合管理战略行动计划(SAP)基线调查报告》^[19]。根据邯郸、安阳农业统计资料,计算出15个子区域单位面积产量和单位面积净收益;经济损失通过单位面积净收益减去采取地下水灌溉的额外生产成本获得;地表水灌溉目标根据计划种植面积计算获得;由于水库入库水量是随机变化的,在一定时期内符合一定的概率分布。本研究通过将概率分布离散为7个不同的区间值及对应的概率进行讨论和求解。由于资料的可获取性,首先根据水库上游入库水文站观台站1956年-2000年的天然径流资料得出其年径流分布,然后根据观台年径流量与岳城水库入库径流的相关关系得出岳城水库的入库年径流量区间及相应的概率。

2.2 研究方法

2.2.1 TSP模型

TSP模型可以概括为如下形式:

$$\max f = cx - E[Q(x, \xi)] \quad (1)$$

满足:

$$Ax \leq b \quad (2)$$

$$x \leq 0 \quad (3)$$

式中: x 为在随机事件未发生时的第一阶段前期决策; $Q(x, \xi)$ 为在给定随机事件结果 Ω 后下述非线性

模型的最优值。

如果将随机向量 ξ 看作是一个有限的离散分布, 满足 $\Omega = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$, 并以 p_i 表示在第 ξ_i 中情景下的概率(对所有 $W_i \in \Omega$ 均有 $p_i > 0$, 且 $\sum_{i=1}^N p_i = 1$), 则第二阶段优化模型的期望值可以被描述为如下形式:

$$EQ(x) = E[Q(x, w)] = \sum_{i=1}^N p_i Q(x, \xi_i) \quad (4)$$

根据公式(4) TSP 模型可以概况为如下确定性平衡模型:

$$\max f = cx - \sum_{i=1}^N p_i q(y_i, \xi_i) \quad (5)$$

满足:

$$Ax \leq b \quad (6)$$

$$T(\xi_i)x + W(\xi_i)y_i = h(\xi_i), \xi_i \in \Omega \quad (7)$$

$$x \geq 0 \quad (8)$$

$$y_i \geq 0 \quad (9)$$

2.2.2 LFP 模型

LFP 模型可概括为

$$\max f(x) = \frac{AX + a}{BX + b} \quad (10)$$

满足:

$$CX \leq D \quad (11)$$

$$X \geq 0 \quad (12)$$

式中: 矩阵 C 为辅助变量; X 和 D 为 n 行和 m 行的列向量; A 和 B 为行向量, 有 n 列; a 和 b 为常数。Charnes 和 Cooper^[20] 的研究表明如果对于 X 的所有可行域分式规划的分母符号始终不变, 那么 LFP 模型可以转化为线性规划模型进行求解。

根据 Chadha^[21] 的研究结果, 如果 (i) 对于所有 X 的可行解存在 $BX + b > 0$, (ii) 目标函数连续可微, (iii) 可行域存在且有界, 那么原分式规划问题模型(10)可以转化为如下等价模型。

$$\min z \quad (13)$$

满足:

$$C^T Y + B^T z \geq A^T \quad (14)$$

$$-D^T Y + bz = a \quad (15)$$

$$Y \geq 0 \quad (16)$$

式中: Y 为列向量; Z 为纯量; T 为矩阵的转置。模型(13)的最优解 (Y, Z) 很容易求出。引入剩余列向量 V , 并且 $V = C^T Y + B^T z - A^T, V \geq 0$ 。

模型(4)的最优解为 X, U 为相关的松弛向量, 那么 $CX + U = D, U \geq 0$ 。根据互补松弛定理, 模型(10)和模型(13)具有相同的最优解, 但必须满足如下的约束条件:

$$\hat{x}_j V_j = 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$\hat{y}_i \hat{u}_i = 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

2.2.3 FTSP 模型

水资源管理者应着眼于岳城水库可供水量变化情况, 对灌区内农业灌溉用水进行分配与规划, 提高单位水量的最大效益。首先, 管理者需要在岳城水库可供水量不确定的情况下规划来年各用户的地表水供水目标。在第二年, 当地表水供水目标得到满足时, 用户将获得经济收益; 而当地表水供水目标没有得到满足时, 各用户为了保证粮食产量, 被迫开采地下水进行灌溉以弥补地表水量的不足, 由于抽取地下水灌溉的成本较高, 因此对用户造成了额外的经济损失。由于水库可供水量具有不确定性, 管理者提前制定的灌溉目标可能不符合实际需求, 因此管理者需要在实施过程中根据水库的实际可供水量对供水目标进行调整, 制定相应供水情景下的实际供水方案, 减少供水不足造成的经济损失。管理者的这个决策过程可以概括为以上两个阶段, 可以被描述为 FTSP 模型。本研究所开发的漳卫南流域 FTSP 模型如下。

$$\max f = \frac{\text{系统净效益}}{\text{可用水量}} = \frac{\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^3 NB_{ij} QT_{ij} - \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 p_k C_{ij} QD_{ijk}}{\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 (QT_{ij} - QD_{ijk})} \quad (19)$$

满足:

$$\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^3 (QT_{ij} - QD_{ijk}) \leq QW_k, \forall k \quad (20)$$

$$QD_{ijk} \leq QT_{ij}, \forall i, j, k \quad (21)$$

$$QD_{ijk} \geq 0, \forall i, j, k \quad (22)$$

式中: f 为系统净收益(元); QT_{ij} 为区域 i 用水单元 j 的水资源规划目标(m^3); NB_{ij} 为区域 i 用水单元 j 每单位用水的净收益(元/ m^3); C_{ij} 为对于区域 i 不能得到满足的每单位用水所带来的损失(元/ m^3); QW_k 为 k 水平下所承诺的最大水量(m^3); QD_{ijk} 为当季节性流量在用水规划目标中不能被满足的水量(m^3); P_k 为径流水平 k 发生的概率; i 为用水区域, i 为 15 个研究区; j 为用水单元 $j = 1, 2, 3$ 分别代表小麦、玉米、棉花; k 为径流水平, $k = 1, 2, 3$ 分别代表低径流水平、中径流水平和高径流水平。将模型(19)整理为标准的 LFP 模型, 根据等价模型(13)及公式(17)、公式(18)即可进行求解。

3 结果与分析

根据岳城水库年观测结果显示, 每日因为蒸发和渗漏引起的蓄水量变化很稳定, 平均每日水位减少约 1 cm。通过计算, 当库容在 1.1 亿 m^3 以下时,

水位每下降 1 cm, 库容相应减少约 15 万 m³; 当库容大于 1.1 亿 m³ 时, 水位每下降 1 cm, 库容减少 20 万 m³。由此可得, 岳城水库库区年损失量在 5 475 万 m³ 至 7 300 万 m³ 范围内。通过以上计算统计得出多年岳城水库不同径流水平下灌区水资源供应量, 见表 1。

表 1 不同径流水平下灌区水资源供应概率及供应量

Tab. 1 Available water resources for irrigation under different reservoir inflows

径流水平	出现概率	农业可供水量/万 m ³
低(k1)	0.3	10 805
中(k2)	0.6	12 725
高(k3)	0.1	30 271

FTSP 模型的特点在于可以将提前制订的水资源管理方案与预期的经济效益联系在一起, 管理者通过确定下一年各用户的灌溉目标制定不同的水资源分配方案。因此, 本研究根据不同的灌溉目标, 考虑了以下 4 种典型水资源分配情景(供水情景)。

最优策略(S1): 该决策情景将 ITSP 模型求解得到的最优水资源分配量进行供水决策, 该决策可使单位水量灌溉效益最大。

乐观策略(S2): 该决策情景对下一年可供水量持乐观态度, 认为各个用户地表水需水量均能得到满足。这种情景由于供水目标较高, 适用于水资源充足可供水量较高时的情况; 但当可利用供水量不足时, 这种决策情景会导致严重的水资源短缺。

保守策略(S3): 管理者对未来可供水量持保守态度, 认为各个用户的地表水需水量难以得到保障, 各用户的灌溉目标取供水目标的最小值。该决策情景由于供水目标比较低不易造成水资源短缺; 但当时水量比较充足时可能导致部分水资源得不到充分的利用。

中间策略(S4): 管理者对未来的可供水量持中立态度, 介于乐观和保守之间, 对各用户的供水目标取目标供水区间的中间值。该决策情景由于灌溉供水目标适中, 水资源短缺的风险适中。

由于不同的决策, 会导致下一次决策发生相应的变化, 最终反映在灌溉总收益、边界效益和缺水损失的变化上。因此, 通过不同决策情景的对比分析, 可以探讨不同决策下的边界效益。岳城水库对民有灌区和漳南灌区的分水比例对两灌区的后续水资源分配起着重要作用。岳城水库修建至今, 先后进行了三次分水方案调整, 目前, 民有、漳南两渠的水资源分配比例为 6: 4。

表 2 为 FTSP 模型计算得到的不同供水情景下水资源分配比例。总体上看, 不同的供水情景对应的两渠水资源分配比例不同, 各情景下民有灌渠分

得的水量均比漳南渠高, 所有供水情景下两渠供水比例在 7: 3 到 5: 5 之间。在最优策略(S1)情景下, 民有、漳南两渠供水比例分别为 57.3%、42.7%; 在保守策略(S3)情景下, 民有、漳南两渠供水比例分别为 67.7%、32.3%; 乐观策略 2 下, 民有、漳南两渠供水比例分别为 52.2%、47.8%, 表明水量几乎平均分配。与岳城水库原有的水资源分配方案相比, 本研究 FTSP 模型计算得到的水资源分配比例随着供水情景的不同和用水需求的变化而变化。这为决策者提供了更多的方案选择, 也更能适应水资源实际的年际变化。

表 2 不同供水情景水资源分配比例

Tab. 2 Water allocation rate under different targets (%)

供水情景	1	2	3	4
民有	57.3	52.2	67.7	56.7
漳南	42.7	47.8	32.3	43.3

模型求解得出了灌区 15 个区县的 3 种作物 4 种供水情景地表水资源分配方案, 见图 2。研究发现 4 种供水情景下灌区各个区县小麦供水总量最大, 为 1.19 亿 m³, 明显高于玉米、棉花的供水量; 棉花的供水量最小, 为 1 613.72 万 m³。肥乡县、曲周县、成安县和广平县棉花供水量比小麦、玉米供水量大, 原因在于这四个地区人口密度高, 劳动力充足, 棉花种植面积大。开发区棉花地表水供水量为零, 主要由于该区几乎没有大面积的棉花种植。

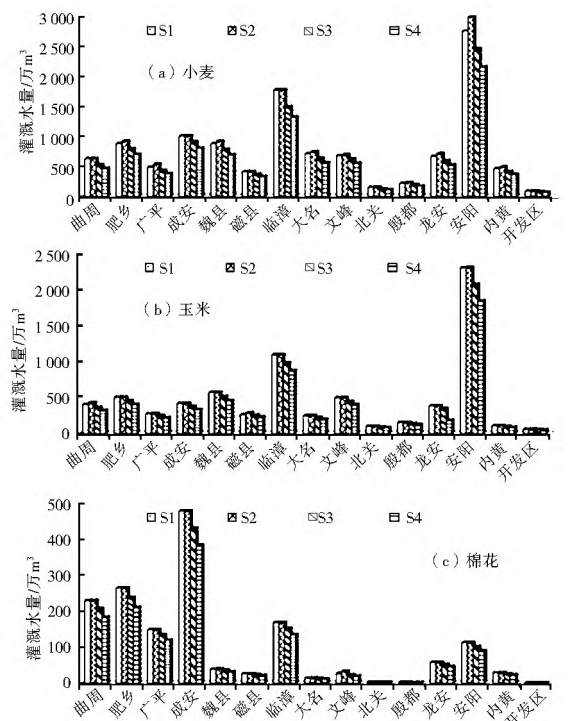


图 2 FTSP 模型不同作物不同情景地表水供应量

Fig. 2 Comparison of solutions of optimized irrigation targets from FTSP model

各地区不同径流水平下的用水结构见图 3、图 4。由图可知,不同径流水平下供水结构存在着较大差异。当岳城水库为高径流水平时(k3),所有 15 个区域均能得到地表水。在高径流水平时,安阳、临漳和成安为灌区 3 个主要地表水资源用户,各自所获得的地表水分别占岳城水库总供水量的 24.80%、14.54%和 9.14%,其余 12 各地区的用水比例均在 9%以下,其中殷都、北关和开发区的用水量最小,在 2%以下。

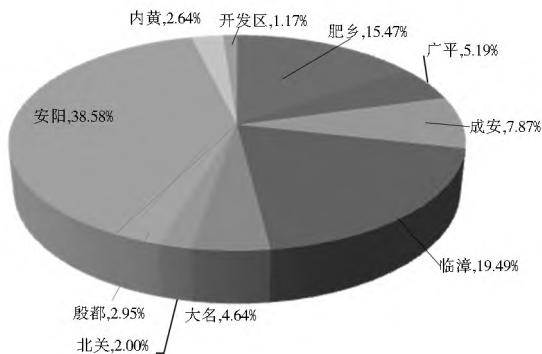


图 3 低径流水平各地区间的用水结构 (k1)

Fig. 3 Optimized water irrigation structure under inflow level 1

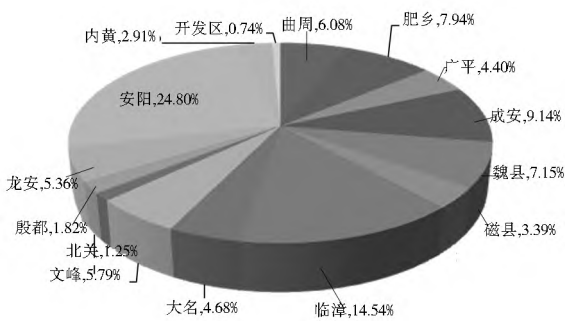


图 4 高径流水平各地区间的用水结构 (k3)

Fig. 4 Optimized water irrigation structure under inflow level 3

4 结论

本研究基于 LFP 模型和 TSP 模型开发了一种分式两阶段随机规划模型(FTSP)用于漳卫南流域农业水资源管理,主要探讨了不确定条件下农业灌溉用水的规划问题。通过对 ITSP 模型的运算和分析,可以认为:(1)不同决策情景所对应的经济效益和缺水风险不同,在最优决策实现了经济效益和缺水风险之间的最好平衡;(2)不同的供水情景对应的两渠水资源分配比例不同,各情景下民有灌渠分得的水量均比漳南渠高;(3)不同径流水平下,各用户的正常灌溉面积会发生相应变化,其中在低径流水平 k1 时仅 10 个区县得到了正常灌溉,在高径流水平 k3 时所有用户均能得到正常灌溉。然而,FTSP 模型仍然存在需要完善之处。例如,FTSP 模型不

能解决系统中存在模糊不确定的情况,也不能分析模型各参数为区间数时水资源分配的问题,而研究对象仅现有灌区农业水资源用户,未考虑市政、工业和生态用水,也为考虑地表地下水联合调度等问题。因此在今后的研究工作中应根据实际需要,开发漳卫南岳城水库灌区更加完善的水资源管理模型。

参考文献(References):

- [1] Rees H G, Holmes M G R, Fry M J, et al. An integrated water resource management tool for the Himalayan region[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21: 1001-1012.
- [2] 左其享,李可任.最严格水资源管理制度理论体系探讨[J].南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 34-38, 65. (ZUO Qi xing, LI Ke ren. Discussion on theoretical system of the strictest water resources management system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 34-38, 65. (in Chinese))
- [3] Su L Y, Christensen P, Liu J L. Comparative study of water resource management and policies for ecosystems in China and Denmark[J]. Journal of Environmental Informatics, 2013, 21: 72-83.
- [4] Zeng X T, Li Y P, Huang W, et al. Two stage credibility-constrained programming with Hurwicz criterion (TCPCH) for planning water resources management[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 35: 164-175.
- [5] Fu D Z, Li Y P, Huang G H. A factor-based dynamic analysis method for reservoir operation under fuzzy stochastic uncertainties[J]. Water Resources Management, 2013, 27(13): 459-4610.
- [6] Huang G H, Loucks D P. An inexact two stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2000, 17: 95-118.
- [7] Eiger G, Shamir U. Optimal operation of reservoirs by stochastic programming[J]. Engineering Optimization, 1991, 17: 293-312.
- [8] Darby-Dowman K H, Barker S, Audsley E, et al. A two stage stochastic programming with recourse model for determining robust planting plans in horticulture[J]. Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(1): 83-89.
- [9] Luo B, Maqsood I, Yin, Y Y, et al. Adaptation to climate change through water trading under uncertainty - an inexact two stage nonlinear programming approach[J]. Journal of Environmental Informatics, 2003, 2(2): 58-68.
- [10] Maqsood I, Huang G H, Zeng G M. An inexact two stage mixed integer linear programming model for waste management under uncertainty[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2004, 21(3): 187-206.
- [11] Li Y P, Huang G H, Veawab A, et al. Two stage fuzzy stochastic robust programming: a hybrid model for regional air quality management[J]. Air & Waste Management Association, 2006, 56: 1070-1082.
- [12] Mobasheri F, Harboe R C. A two stage optimization model for design of a multipurpose reservoir[J]. Water Resources Research, 1970, 6: 22-31.

(下转第 135 页)

- Mechanics, 2004, 25(12): 1999-2002. (in Chinese)
- [2] 王东星, 徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3659-3664. (WANG Dongxing, XU Weiyu. Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3659-3664. (in Chinese))
- [3] 白玉恒. 粉煤灰固化淤泥路用性能及填筑技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (BAI Yuheng. Study on road performance and filling technology of solidified muddy soil by fly ash[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese))
- [4] 范公俊. 固化淤泥的收缩性质及其控制措施研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (FAN Gongjun. Study on the shrinkage property and shrinkage control of solidified dredged material[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [5] 黄英豪, 朱伟, 张春雷, 等. 固化淤泥重塑土力学性质及其强度来源[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1352-1356. (HUANG Yinghao, ZHU Wei, ZHANG Chunlei, et al. Mechanical characteristics and strength source of remolded solidified dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1352-1356. (in Chinese))
- [6] 黄英豪, 董婵, 关云飞, 等. 击实对固化淤泥物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(09): 1728-1733. (HUANG Yinghao, DONG Chan, GUAN Yunfei, et al. Effect of compaction on physical and mechanical properties of solidified dredged materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(09): 1728-1733. (in Chinese))
- [7] 黄英豪, 朱伟, 周宣兆, 等. 固化淤泥压缩特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 2923-2928. (HUANG Yinghao, ZHU Wei, ZHOU Xuanchao, et al. Experimental study of compressibility behavior of solidified dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 2923-2928. (in Chinese))
- [8] 朱伟, 冯志超, 张春雷, 等. 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究[J]. 中国港湾建设, 2005(5): 27-30. (ZHU Wei, FENG Zhichao, ZHANG Chunlei, et al. Field experiment of dredged spoil solidified with cement for marine reclamation works[J]. China Harbour Engineering, 2005(5): 32-35. (in Chinese))
- [9] 刘仁钊. 基于不同固化剂作用下淤泥改良前后力学性能变化研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013. (LIU Renzhao. Based on the effect of different curing agents and the change of mechanical properties of sludge improved research[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [10] Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement stabilised soil[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(7): 811-820.
- [11] Kaniraj S R, Havanagi V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash soil mixtures[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(5): 673-677.
- [12] 耿树泽, 侯明业, 赵娟娟, 等. HSC301 化淤泥填筑路基性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013(6): 49-51. (GENG Shuze, HOU Mingye, ZHAO Juanjuan, et al. Study on performance of subgrade built with HSC301 solidified silt[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013(6): 49-51. (in Chinese))
- [13] 陈士强, 季光明, 杨国录等. 清淤泥浆脱水固结一体化处理方法[P]. 中国: CN101746942A, 2010. (CHENG Shiqiang, JI Guangming, YANG Guolu, et al. Dredging dewatering and consolidation of mud integration processing method[P]. China: CN101746942A, 2010)
- [14] JTG D030-2004, 公路路基设计规范[S]. 2004. (JTG D030-2004, Specifications for Design of Highway Subgrades[S]. 2004. (in Chinese))
- [15] 陈仲颐, 周景星, 王洪谨. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (CHEN Zhongyi, ZHOU Jingxing, WANG Hongjin. Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [16] 白寿光. 某市政道路改良土水泥掺量研究[J]. 山西建筑, 2007, 33(10): 303-304. (BAI Shouguang. Research into cement admixture quantity of improved soil in a certain municipal road[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(10): 303-304. (in Chinese))

(上接第 74 页)

- [13] Wang D, Adams B J. Optimization of real time reservoir operations with Markov decision processes[J]. Water Resources Research, 1986, 22: 345-352.
- [14] Pereira M V F, Pinto L M V G. Stochastic optimization of a multi-reservoir hydroelectric system: a decomposition approach[J]. Water Resources Research, 1985, 21(6): 779-792.
- [15] Pereira M V F, Pinto L M V G. Multi stage stochastic optimization applied to energy planning[J]. Mathematical Programming, 1991, 52: 359-375.
- [16] Chakraborty M, Gupta S. Fuzzy mathematical programming for multi objective linear fractional programming problem[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 125(3): 335-342.
- [17] Stancu Minasian I M. A fifth bibliography of fractional programming[J]. Optimization, 1999, 5(4): 343-67.
- [18] 漳卫南运河志(1996-2005)编委会. 漳卫南运河志[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (Zhangweinan Canal Chronicles volunteers (1996-2005). Zhangweinan Canal Chronicles[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))
- [19] 漳卫南运河管理局 GEF 海河项目办, 漳卫南运河管理局规划设计研究院. 漳卫南运河水资源水环境综合管理战略行动计划(SAP)基线调查报告[R]. 2006. (GEF Haihe River Project Office of Zhangweinan Canal Management Bureau, Zhangweinan Canal Administration Planning Design and Research Institute. Baseline survey report of Zhangweinan Canal water resources and water environment management strategy action plan (SAP)[R]. 2006. (in Chinese))
- [20] Charnes A, Cooper W W. Programming with linear fractional functionals[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1962, 9(3-4): 181-186.
- [21] Chadha S S, Chadha V. Linear fractional programming and duality[J]. Central European Journal of Operations Research, 2007, 15(2): 119-125.