

# 基于代谢理论的城市化—水资源系统协同演化研究

彭思涵<sup>1</sup>, 刘丙军<sup>1,2,3</sup>, 林钟华<sup>1</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 2. 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275; 3. 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州 510275)

**摘要:**城市代谢是物质、能量投入并且产生经济、环境产出的过程,能够有效解析城市化—水资源系统之间复杂的耦合交互作用。基于城市代谢理论,将城市化—水资源系统代谢过程分解为同化过程和异化过程,并采用DEA模型研究了珠江三角洲近15年来城市化—水资源系统同化、异化效率,对珠江三角洲城市化—水资源系统协同演化情况进行分析,指出其发展中存在的问题及未来发展的方向。研究表明:(1)对比同化效率,近15年来珠江三角洲异化效率保持在较高水平,城市化对水资源系统的输出扰动作用明显。(2)珠江三角洲城镇化率,经济水平和消费水平在提高水资源利用效率的前提下还有很大的提高空间。在未来发展过程中,珠江三角洲的城市化发展应该从提高技术水平方面去入手,而非一味地增加资源投入。

**关键词:**城市化—水资源系统;同化—异化过程;城市代谢;珠江三角洲

**中图分类号:**TV211

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2019)04-0001-06

城市化—水资源系统是资源、社会经济与自然环境协同进化的复合系统。社会经济的快速发展与人口的急剧增加致使城市化发展的速度不断加快,由此导致的用水需求激增以及废污水过量排放对水资源系统产生了严重胁迫和破坏。作为城市化发展的基本要素,生态功能受损的水资源系统反过来也会影响和约束城市化系统发展,水资源供需矛盾及水环境污染问题成为阻碍城市化可持续发展的重要因素之一。因此,研究城市化与水资源两个系统协同关系对解决区域水资源问题具有重要意义,有利于区域可持续发展。

近年来,众多学者从多方面对城市化和水资源系统的耦合协同关系进行了研究。在研究内容上,从单一的水资源约束下的城市化发展以及城市化进程中水资源承载力研究,发展到城市化与水资源系统的耦合度测算及其时空分异研究<sup>[1-2]</sup>。在研究方法上,从简单的数理统计模型逐渐发展到动态耦合模型,灰色关联法等<sup>[3-4]</sup>。在指标体系方面,从分析单一指标发展到复合

指标体系<sup>[5]</sup>。城市化与水资源系统的耦合度和耦合方法研究已取得显著成果<sup>[6-8]</sup>,但两个系统耦合交互作用机制相关研究仍需加强。城市化与水资源系统之间复杂的交互作用关系可以通过代谢理论引申出来的同化—异化过程进行解析。

我国珠江三角洲地区依托着优越的地理位置和国家的政策支持经济社会得到快速发展。然而,在快速城市化和剧烈人类活动等多重因素共同影响下,该地区水资源系统安全面临多重压力,如水资源供需矛盾大,水污染严重,河口区咸潮上溯影响程度与范围不断增大等,这严重威胁到城市供水安全和河道生态环境健康,使珠江三角洲成为我国南方城市化与水资源系统可持续发展矛盾最为突出的典型地区之一<sup>[7-8]</sup>。基于此,本文采用代谢理论对珠江三角洲城市化—水资源系统协同演化过程进行研究,以期对珠江三角洲城市化发展过程水资源合理配置和水环境保护等方面提供理论依据。

收稿日期:2018-06-12

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0401300;2017YFC0405900);国家自然科学基金项目(91547108;91547202);水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金资助项目([2017]KJ07);高校基本科研业务费中山大学青年教师重点培育项目“海陆相多要素驱动下珠三角网河区咸潮上溯规律与中长期预报”(17LGZD03)

作者简介:彭思涵(1993-),女,广东汕头人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: pengsh7@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:刘丙军(1976-),男,湖南益阳人,教授,博士,从事水资源系统分析研究。E-mail: liubj@mail.sysu.edu.cn

## 1 研究方法

### 1.1 城市化—水资源系统同化—异化特征分析

城市代谢理论(Urban Metabolism)最早由 Wolman 于 1965 年在其著作中提出<sup>[9]</sup>。此后,城市代谢的概念被不断丰富并被引入和广泛应用到城市生态环境和资源利用等研究中<sup>[10-12]</sup>。与自然代谢的过程类似,城市代谢被认为是一个物质、能量投入并且产生经济、社会、环境产出的系统过程。该理论研究的核心在于对资源和能源投入产出的系统性分析,用于探求城市内部某组分的代谢过程及其对城市的影响作用<sup>[11]</sup>。代谢理论已被广泛应用于水资源系统研究,如 Hermanowicz 和 Takashi<sup>[12]</sup>将城市代谢过渡到城市水代谢;丹保宪仁提出把城市看成一个有机系统,则城市水系统的“水质”污染实际上是城市物质代谢失衡的结果<sup>[13]</sup>;钱家忠等从系统的观点出发,提出了地球水循环过程中地下水代谢的概念<sup>[14]</sup>;Jenerette 等通过水足迹系统动力学方法来研究水代谢系统<sup>[15]</sup>。

城市化系统与水资源系统存在一种相互支持又相互制约的复杂关系,且互为物质能量输入、输出的投入产出系统。引入城市代谢理论,用城市代谢效率测度城市化—水资源系统代谢程度,结合生物学理论,将这一代谢过程进一步表达为城市化系统的同化过程和异化过程<sup>[16]</sup>(见图 1)。同化过程表征为水资源系统投入与城市化产出的过程,即水资源系统对城市化系统的基础支撑作用,为城市化系统的生产发展、居民生活、生态环境保护提供物质和能量保障。但水资源作为一种稀缺资源,对城市化系统的发展又存在一定约束与限制,若超过其承载能力就会出现城市化发展速度减缓甚至停滞后退的现象。同化过程追求要素投入—产出的效率最大化;异化过程则表征为城市化投入与水资源系统产出的过程,即城市化发展对水资源系统的优化提升和胁迫作用,如资金的投入和技术的进步会促进用水效率,节水水平和水污染治理水平的提高,高强度废污水排放会导致水环境系统生态功能受损。异化过程一方面追求城市化带来的正面促进效益(期望产出)的最大化,另一方面追求向环境释放的有害物质(非期望产出)的最小化。

### 1.2 数据包络分析(DEA)

数据包络分析(Data Envelopment Analysis,简称 DEA)是一种计算具有相同类型的多投入和多产出的若干决策单元(Decision Making Unit,简称 DMU)相

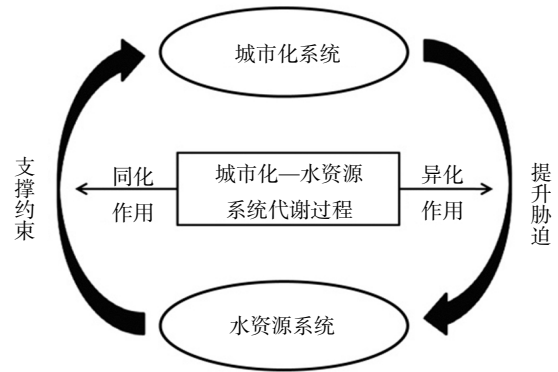


图 1 城市化—水资源系统代谢过程示意图

Fig.1 The metabolic processes of the urbanization-water resources system

对效率的非参数统计方法,本文采用该方法来评估近 15 年来珠江三角洲城市化—水资源系统代谢过程。DEA 不需预先估计参数和假设权重,避免具体表达投入与产出的关系,能够有效减少主观因素以及误差的影响。同时,DEA 可以根据评价结果判断评价对象是否存在投入冗余或者产出不足的问题。目前,DEA 被广泛引用用于投入产出效率的评价中<sup>[17-18]</sup>。

DEA 发展到现在已经有多个模型,其中, $C^2R$  和  $BC^2$  是最基本的两个模型<sup>[19]</sup>。 $C^2R$  是 DEA 的第一个模型。该模型如下:假设有  $n$  个决策单元 DMU,每个决策单元  $DMU_j$  有  $m$  种投入和  $s$  种产出,则其投入向量为  $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{mj})^T$ ,产出向量为  $y_j = (y_{1j}, y_{2j}, y_{3j}, \dots, y_{sj})^T$ 。设  $DMU_{j_0}$  的投入产出为  $(x_{j_0}, y_{j_0})$ ,记为  $(x_0, y_0)$ ,则该决策单元相应的效率评价指数即投入和产出的相对效率值  $\theta$  满足:

$$\begin{aligned} \min \theta \\ \sum_{j=1}^n x_j \lambda_j + s^- = \theta x_0 \\ \sum_{j=1}^n y_j \lambda_j - s^+ = y_0 \\ s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \\ \lambda_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $s^-$ 和 $s^+$ 为松弛变量,分别表示投入冗余和产出不足; $\lambda_j$ 为投入和产出的权向量。

式(1)计算得到的效率值  $\theta$  为综合效率值,在此模型的基础上增加了凸性假设  $\sum \lambda_j = 1$  就得到  $BC^2$  模型,可求得纯技术效率值。根据综合效率=纯技术效率×规模效率,可计算得出规模效率值。综合效率主要反映了每个决策单元的投入产出效率,纯技术效率主要反映在既定规模下要素投入结构是否合理,规模效

率主要反映要素投入规模是否合理。

若式(1)最优值  $\theta^*=1$ , 则说明该决策单元为 DEA 有效, 即在当前投入条件下, 产出最优。若  $\theta^*<1$ , 则为非 DEA 有效; 若纯技术效率为 1, 说明该决策单元达到最佳技术水平, 资源投入组合合理; 若规模效率为 1, 说明该决策单元投入规模合理, 实现了投入的规模经济。DEA 模型同时给出规模收益, 表征各种投入要素按相同比例变化时所带来的产量变化。对于式(1)最优值  $\lambda^*$ , 若存在  $\lambda_j^*(j=1, 2, \dots, n)$  使得  $\sum \lambda_j^*=1$ , 则 DMU 规模收益不变; 若  $\sum \lambda_j^*<1$ , 则规模收益递增; 若  $\sum \lambda_j^*>1$ , 则规模收益递减。随着投入要素的增加, 产出要素呈现先增加, 达到最优水平, 再减少的变化过程, 分别对应规模收益递增, 不变和递减的状态。

1.3 城市化—水资源系统代谢指标体系

根据城市代谢理论与 DEA 方法的要求, 构建城市化—水资源系统代谢指标体系(见表 1)。其中, 同化过程投入要素的选取考虑珠江三角洲丰富的水资源量及水利基础设施对城市化的支撑作用, 产出要素的选取考虑城市化过程中城镇化率、经济水平、产业结构、消费水平四个方面的发展; 异化过程投入要素的选取考虑城市化系统劳动力投入、资本投入和土地投入对水资源系统的作用。产出要素一是期望产出, 考虑城市化发展给用水, 节水和水污染治理带来的促进效益, 二是非期望产出, 考虑城市向水资源系统释放代谢废物的过程。通过倒数法将非期望产出转换为期望产出, 纳入到 DEA 模型产出部分, 进行城市代谢系统效率的计算。本文研究期时间跨度为 2000~2015 年。其中社会经济数据来源于《广东省统计年鉴》, 水文水资源数据来源于《广东省水资源公报》。

2 结果与分析

2.1 城市同化异化效率分析

通过 DEAP2.1 软件包进行模型计算, 得出珠江三

角洲城市代谢效率。分析珠江三角洲同化过程, 结果如表 2 所示。从综合效率的角度, 研究期珠江三角洲城市同化过程总体可分为两个阶段: 前期(2000~2007 年)和后期(2008~2015 年)。前期同化效率年际变化幅度较大, 平均同化效率为 0.864。其中, 仅 2004 年同化效率为 1, 达到了 DEA 有效, 说明了在当年水资源要素投入条件下城市化发展程度最优。2004 年纯技术效率和规模效率也都达到了最优, 说明了当年水资源要素投入的组合和投入规模达到了最优。后期年际变化幅度较小, 且总体水平较前期高, 平均同化效率为 0.946。总体来看珠江三角洲近 15 年同化效率在波动中上升, 说明水资源要素投入带来的城市化发展程

表2 城市化—水资源系统代谢效率  
Table2 The metabolic efficiency  
of the urbanization-water resources system

年份	同化过程				异化过程			
	综合效率	纯技术效率	规模效率	规模收益	综合效率	纯技术效率	规模效率	规模收益
2000	0.887	0.953	0.931	递减	1.000	1.000	1.000	不变
2001	0.805	0.958	0.841	递减	0.929	1.000	0.929	递增
2002	0.793	0.961	0.824	递减	1.000	1.000	1.000	不变
2003	0.728	0.879	0.828	递减	0.906	0.910	0.996	递减
2004	1.000	1.000	1.000	不变	0.917	0.954	0.962	递减
2005	0.900	0.988	0.911	递减	0.911	0.980	0.930	递减
2006	0.835	0.990	0.844	递减	0.932	0.987	0.944	递减
2007	0.965	0.999	0.966	递减	0.926	0.982	0.942	递减
2008	0.824	0.994	0.829	递减	1.000	1.000	1.000	不变
2009	0.915	0.996	0.919	递减	0.990	0.998	0.992	递减
2010	0.919	0.997	0.922	递减	1.000	1.000	1.000	不变
2011	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变
2012	0.955	0.997	0.957	递减	1.000	1.000	1.000	不变
2013	0.951	0.998	0.953	递减	0.989	0.998	0.991	递减
2014	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变
2015	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变

表1 城市化—水资源系统代谢指标体系  
Table1 The indicators of metabolic processes in the urbanization-water resources system

指标分类		指标名称	指标分类	指标名称
同化过程	水资源	人均水资源占有量/m³	城市化	城镇单位就业人员数/10⁴ 人
	支撑	人均供水量/m³	投入	人均固定资产投资额/元
	要素	大中型水库蓄水量/10⁴ m³	要素	人均建成区面积/km²/10⁴ 人
		城镇人口占总人口比例/%		单位水创造产值/(元·m³)
	城市化	人均 GDP/元	异化过程	工业废水达标率/%
	产出	二三产业产值占 GDP 比重/%	水资源发展	人均 COD 排放量/(kg·(人·年)⁻¹)
	要素	人均社会消费品零售额/元	与威胁要素	人均氨氮排放量/(kg·(人·年)⁻¹)

度提升。从规模收益的角度分析,非 DEA 有效年份均表现为规模收益递减,反映出珠江三角洲加大水资源投入规模已不会带来城市化产出的增加,需提高资源利用的效率,以免造成不必要的水资源浪费。

分析珠江三角洲异化过程,结果见表 2 所示。从综合效率的角度,研究期珠江三角洲城市异化过程同样可分为两个阶段:前期(2000~2007 年)和后期(2008~2015 年)。前期异化效率有较大的震荡,平均异化效率为 0.940。后期异化效率较为稳定,平均异化效率为 0.997。且相比同化效率,研究期异化效率维持在较高水平,说明珠江三角洲城市化—水资源系统的协同演化以城市化对水资源系统的输出扰动为主。研究期后期除了 2009 年和 2013 年之外,其余年份异化效率均为 1,达到了 DEA 有效,说明了这些年份一方面城市化投入对用水效率和水污染治理的促进作用达到最优状态,另一方面城市化产生污染物量与水资源系统可容纳水平持平。从规模收益的角度分析,仅 2001 年规模收益递增,说明研究期前期城市化人员、资金、土地资源投入对用水效率和水污染治理的促进作用未达到最大化,其产生的污染物量也未达到水资源系统的容纳水平,城市化系统适当增加资源投入可以拉动水资源系统产出的增加,但另一方面也会增加污染物排放,但这种增加是在环境容纳水平之内的。此后的年份均表现为规模收益递减,反映了珠江三角洲过饱和的人员、资金、土地资源投入规模已经无法对水资源利用产生促进作用,其产生的污染物量反而会超过水资源系统容量。

## 2.2 投入冗余与产出不足分析

通过 DEA 方法,得到城市化—水资源系统代谢过程投入产出的松弛变量。此研究主要考虑既定投入水平下产出的不足值,因此选取其中产出松弛变量进行分析。从同化过程松弛变量分析结果(见表 3)可以看出,DEA 有效的年份松弛变量  $s_1^+$  为 0,表示这些年份珠江三角洲城市代谢同化过程的产出不足为 0,即投入与产出已达到相对最优。非 DEA 有效的年份则存在产出不足的情况,其中,产出要素中城镇人口占总人口比例、人均 GDP 和人均社会消费品零售额都存在明显的产出不足现象,说明导致珠江三角洲同化过程投入与产出水平非最优效率的主要因素是城镇人口占总人口比例、人均 GDP 和人均社会消费品零售额,反映出珠江三角洲城镇化率,经济水平和消费水平在提高水资源利用的效率前提下还有很大的提高空间。

从异化过程松弛变量结果可以看出,研究期内工业废水达标率松弛变量均为 0,反映了珠江三角洲城市化过程中废污水处理技术和效率保持在较高水平。而单位水创造产值和人均氨氮排放量存在非零松弛变量年份最多,说明单位水创造产值和人均氨氮排放量是造成异化过程投入与产出水平非最优效率的主要原因,结合 2.1 节分析的结果,可以看出珠江三角洲的城市化发展应该从提高技术水平方面去入手,如提高用水效率以及提高氨氮处理技术减少氨氮排放量,而不是一味地增加人员、资金、土地投入。从总体来看,近几年珠江三角洲异化过程产出不足情况逐渐变少,这也说明了珠江三角洲水资源投入和城市化产出的效率在逐渐提高。

表3 城市化—水资源系统代谢过程产出松弛变量取值  
Table3 The output slack variables of metabolic processes in the urbanization-water resources system

年份	同化过程				异化过程			
	$s_1^+$	$s_2^+$	$s_3^+$	$s_4^+$	$s_1^+$	$s_2^+$	$s_3^+$	$s_4^+$
2000	10.821	6.193	0.000	2.027	0.000	0.000	0.000	0.000
2001	9.897	7.238	0.000	2.477	0.000	0.000	0.000	0.000
2002	8.837	7.543	0.000	2.611	0.000	0.000	0.000	0.000
2003	0.000	7.063	3.310	2.488	0.000	0.000	0.000	0.002
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	5.291	0.000	0.001	0.006
2005	2.722	4.199	0.000	1.510	10.186	0.000	0.001	0.006
2006	2.786	4.868	0.000	1.905	5.211	0.000	0.000	0.004
2007	0.911	1.424	0.000	0.603	6.507	0.000	0.000	0.006
2008	3.247	3.814	0.000	1.628	0.000	0.000	0.000	0.000
2009	2.445	1.552	0.000	0.618	0.426	0.000	0.000	0.002
2010	2.432	3.122	0.000	1.197	0.000	0.000	0.000	0.000
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2012	0.240	1.432	0.000	0.591	0.000	0.000	0.000	0.000
2013	0.424	1.301	0.000	0.589	0.000	0.000	0.001	0.000
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:同化过程  $s_1^+$ 、 $s_2^+$ 、 $s_3^+$ 、 $s_4^+$  分别表示城镇人口占总人口比例、人均 GDP、二三产业产值占 GDP 比重和人均社会消费品零售额的松弛变量。异化过程  $s_1^+$ 、 $s_2^+$ 、 $s_3^+$ 、 $s_4^+$  分别表示单位水创造产值、工业废水达标率、人均 COD 排放量和人均氨氮排放量的松弛变量。

## 3 结 论

城市代谢理论能够有效解析城市化—水资源系统之间复杂的耦合交互作用,通过引入城市代谢理论,从有效性的角度分析了 2000~2015 年珠江三角洲

城市化与水资源系统协同演化过程及其发展问题和趋势,得到以下结论:

(1)研究期珠江三角洲城市同化过程和异化过程总体均可分为两个阶段:前期(2000~2007年)和后期(2008~2015年)。同化效率前期年际变化幅度较大,后期年际变化幅度较小,且总体水平较前期高。异化效率前期波动较大,后期异化效率较为稳定。对比同化效率,研究期珠江三角洲异化效率保持在较高水平,说明珠江三角洲城市化与水资源系统协同演化过程以城市化对水资源的输出扰动为主。

(2)导致珠江三角洲同化过程投入与产出水平非最优效率的主要因素是城镇人口占总人口比例、人均GDP和人均社会消费品零售额,反映了珠江三角洲城镇化率,经济水平和消费水平在提高水资源利用的效率前提下还有很大的提高空间;导致异化过程投入与产出水平非最优效率的主要因素是单位水创造产值和人均氨氮排放量,说明珠江三角洲的城市化发展应该从提高技术水平方面去入手,如提高用水效率以及提高氨氮处理技术,而不是一味地增加资源投入。

#### 参考文献:

- [1] 鲍超,方创琳.干旱区水资源对城市化约束强度的情景预警分析[J]. 自然资源学报, 2009,(9):1509-1519.(BAO Chao, FANG Chuanglin. Scenario warning and analysis of water resources constraint intensity on urbanization in arid area [J]. Journal of Natural Resources, 2009,(9):1509-1519. (in Chinese))
- [2] 杨雪梅,杨太保,石培基,等.西北干旱地区水资源-城市化复合系统耦合效应研究——以石羊河流域为例[J]. 干旱区地理, 2014,(1):19-30.(YANG Xuemei, YANG Taibao, SHI Peiji, et al. Coupling effect of water resources-urbanization composite system in north west arid region of China: a case of Shiyang River basin [J]. Arid Land Geography, 2014,(1):19-30. (in Chinese))
- [3] 张胜武,石培基,王祖静.干旱区内陆河流域城镇化与水资源环境系统耦合分析——以石羊河流域为例[J]. 经济地理, 2012,(8):142-148.(ZHANG Shengwu, SHI Peiji, WANG Zujing. Analysis of coupling between urbanization and water resource and environment of inland river basin in arid region: a case study of Shiyang River basin[J]. Economic Geography, 2012,(8):142-148. (in Chinese))
- [4] Ma H,Chou N,Wang L. Dynamic coupling analysis of urbanization and water resource utilization systems in China [J]. Sustainability, 2016,8(11):1176.
- [5] 李娜,孙才志,范斐.辽宁沿海经济带城市化与水资源耦合关系分析[J]. 地域研究与开发, 2010,(4):47-51. (LI Na, SUN Caizhi, FAN Fei. The coupling relation analysis between urbanization and water resources in Liaoning coastal economic zone[J]. Areal Research and Development, 2010,(4):47-51. (in Chinese))
- [6] Bao C, Fang C. Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: a case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China[J]. Ecological Economics, 2007,62(3-4):508-517.
- [7] 时翠,陈晓宏,张强.近几十年来珠江三角洲1月和7月水位变异分析[J]. 热带地理, 2012,(3):233-240.(SHI Cui, CHEN Xiaohong, ZHANG Qiang. Change-points of water levels in the Pearl River delta in January and July for the last decades [J]. Tropical Geography, 2012,(3):233-240. (in Chinese))
- [8] 孔兰,陈晓宏,闻平,等.2009/2010年枯水期珠江口磨刀门水道强咸潮分析[J]. 自然资源学报, 2011,(11):1858-1865.(KONG Lan, CHEN Xiaohong, WEN Ping, et al. Analysis on severe saltwater intrusion in Modaomen Channel of the Pearl River Estuary in dry season during 2009-2010 [J]. Journal of Natural Resources, 2011,(11):1858-1865. (in Chinese))
- [9] Wolman A. The metabolism of cities [J]. Scientific American,1965, (213): 179-190.
- [10] 陈雪婷,宋涛,蔡建明,等.基于DEA和Malmquist的中国城市代谢效率研究[J]. 地理科学, 2015,(4):419-426. (CHEN Xueting, SONG Tao, CAI Jianming, et al. The Chinese urban metabolic efficiencies based on the DEA and Malmquist [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015,(4):419-426. (in Chinese))
- [11] 宋涛,蔡建明,倪攀,等.城市新陈代谢研究综述及展望[J]. 地理科学进展, 2013,(11):1650-1661.(SONG Tao, CAI Jianming, NI Pan, et al. Review and prospects of urban metabolism research [J]. Progress in Geography, 2013(11):1650-1661. (in Chinese))
- [12] Hermanowicz S W, Asano T. Abel Wolman's the metabolism of cities' revisited: a case for water recycling [J]. Water Science & Technology, 1999,40(4):29-36.
- [13] 丹保宪仁.水文大循环和城市水环境代谢[J]. 给水排水, 2002,28(6):1-5. (Tambo Norihito. Hydrological cycle and urban metabolic system of water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2002,28(6):1-5. (in Chinese))
- [14] 钱家忠,朱学愚,孙峰根.地下水代谢与水资源保护[J]. 工程勘察, 2000,(4):26-28.(QIAN Jiazhong, ZHU Xueyu, SUN Fenggen. Metabolism of groundwater and protection of water resources [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000,(4):26-28. (in Chinese))
- [15] Jenerette G D, Wu W, Goldsmith S, et al. Contrasting water footprints of cities in China and the United States [J]. Ecological Economics, 2006,57(3):346-358.
- [16] 刘贺贺,杨青山.新陈代谢视角下东北地区城市健康诊断[J]. 干旱区资源与环境, 2016,(3):25-31.(LIU Hehe, YANG Qingshan. Urban health diagnosis for the Northeast China from the perspective of urban metabolism [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016,(3):25-31. (in Chinese))
- [17] 王莹.基于DEA的江苏省工业水资源利用效率研究[J]. 水利经济, 2014,(5):19-22. (WANG Ying. Industrial water use efficiency of Jiangsu Province based on DEA[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014,(5):19-22. (in Chinese))
- [18] 蒙古军,汪疆玮,尤南山,等.基于DEA的黑河中游灌区水资源配置效率时空分异[J]. 水土保持研究, 2017,(1):173-180. (MENG Jijun, WANG Jiangwei, YOU Nanshan, et al. Spatiotemporal

differentiation of water allocation efficiency in oasis irrigated areas in the middle reaches of the Heihe River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,(1):173-180. (in Chinese))

[19] Helm D, Rajah N. Water regulation: the periodic review[J]. Fiscal Studies, 1994,15(2):95-97.

## Study on Co-evolution of Urbanization-Water Resources System Based on Urban Metabolism

PENG Sihan<sup>1</sup>, LIU Bingjun<sup>1,2,3</sup>, LIN Zhonghua<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou 510275, China;  
3. Engineering Research Center for Water Security Regulation in Southern China of Guangdong Province, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Urban metabolism is the process of inputs of material and energy as well as economic and environmental outputs, which can be used to analyze the interactive coupling relationship between urbanization-water resources systems. Based on the urban metabolism, this paper divided the metabolic processes of urbanization-water resources system into assimilation processes and dissimulation processes. A DEA model was applied to evaluate the assimilation efficiency and dissimulation efficiency of urbanization-water resources system in the Pearl River Delta over recent 15 years. Then, the co-evolution between urbanization-water resources system and its problems and future of the development were analyzed. The results show: (1) Compared with the assimilation efficiency, the dissimulation efficiency of the Pearl River Delta with a high level in recent 15 years shows that there was an obvious output disturbance of urbanization on water resources system. (2) There is high potential for increase in urbanization rate, economic level, and consumption level on the premise of improving water efficiency. The urbanization of the Pearl River Delta should focus on enhancing the technical level rather than increasing the resource input in the future.

**Key words:** urbanization-water resources system; assimilation- dissimulation process; urban metabolism; Pearl River Delta

(上接第 56 页)

## Analysis of Wetness-dryness Inflow Encountering of Nierji and Fengman Reservoirs in Songhuajiang River Basin

WANG Xiaoni<sup>1</sup>, LIANG Tuanhao<sup>1</sup>, YIN Xiongwei<sup>2</sup>

(1. Basin Planning & Policy Research Center, Songliao Water Resources Commission, Changchun 130021, China;  
2. Songliao Water Resources Commission, Changchun 130021, China)

**Abstract:** The reservoirs of Nierji and Fengman are the control projects of the Songhuajiang River basin. The joint application of the 2 reservoirs is of great significance for the water resources allocation in the Songhuajiang River basin above the Harbin Hydrometry Station. In this paper, annual inflow series of the Nierji and Fengman reservoirs were used to build the joint probability distribution model for the 2 reservoirs based on Copula function. The results show that the wetness-dryness asynchronous frequency (60.79%) of the 2 reservoirs is significantly higher than the wetness-dryness synchronous frequency (39.22%) of the Fengman reservoir, indicating the inflow condition is helpful for the joint-operation of the 2 reservoirs; The probability of insignificant conditions for the reservoirs joint-operation is 40.9%; the probability of the favourable conditions for the reservoirs joint-operation is 43.18%; the probability of adverse conditions for the reservoirs joint-operation is 15.92%. Due to that the probability of adverse conditions is not low and once it occurs, it will have great influence on the water supply. Therefore, seriously consideration should be given in the formulation of joint operation plan.

**Key words:** Nierji reservoir; Fengman reservoir; Songhuajiang River basin; reservoir inflow; wetness-dryness encountering