

---

# 岩溶地区水资源与经济发展脱钩分析

杨振华<sup>1</sup>, 苏维词<sup>\*2, 3</sup>, 赵卫权<sup>2</sup>

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 中国贵州贵阳550001;

2. 贵州省山地资源研究所, 中国贵州贵阳550001;

3. 重庆师范大学地理与旅游学院, 中国重庆 401331)

**【摘要】**为揭示城市水资源利用与经济发展水平的耦合性, 弥补水足迹单纯考虑经济发展对水资源占用的缺陷, 文章采用“水生态足迹”与“脱复钩”理论, 从水量(用水量)和水质(污染物排放量)的综合视角, 采用Tapio弹性指数评价贵阳市2002—2014年水生态足迹与经济脱钩水平。研究表明: 2002—2014年贵阳市水生态足迹与经济发展除2011年扩张性水质型负脱钩外, 其余年份为水量型或水质型强(弱)脱钩, 且历年脱钩指数时间序列上波动明显, 其脱钩平均值为0.138; 由于贵阳市GDP增速稳定, 故水资源与经济脱钩程度取决于水量和水质生态足迹的变化特征。实现贵阳市水资源与社会经济的可持续发展, 不仅要限制工业用水和污水排放量, 还要节约生活用水量, 减少城市生活污水排放量。另外, 相比水足迹, 运用水生态足迹的视角评价水资源与经济脱钩态势更具科学性、全面性, 有助于丰富水资源与经济脱钩评价角度。

**【关键词】**岩溶地区; 水生态足迹; 脱钩; 水资源; 贵阳市

**【中图分类号】**X24

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1000 - 8462 (2016) 10 - 0159 - 07

DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2016.10.022

岩溶地区水循环受“二元”结构效应的影响, 地表蓄水能力差, 可利用水资源缺乏, 工程性缺水严重, 对产业结构转型的约束性强, 特别是耗水工业和农业方面; 地表起伏大, 土层稀薄, 多季节性径流, 对水污染物的消纳净化能力有限; 裂隙、落水洞的发育导致地下水与地表水形成联动污染, 减少可利用水资源量, 加剧岩溶地区的缺水境况, 水资源与社会经济发展的矛盾也愈加突显。因此, 分析岩溶地区水资源与社会经济的脱钩关系, 应当综合考虑社会经济活动与水量(用水量)和水质(污染物排放量)的关系, 而不能单纯考虑各部门的用水结构。

---

**收稿时间:** 2016 - 03 - 14; **修回时间:** 2016 - 06 - 23

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41261038)

**作者简介:** 杨振华(1991—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生。主要研究方向为遥感与地理信息系统。E-mail: yang750@sina.com。

**※通讯作者:** 苏维词(1965—), 男, 湖南绥阳人, 研究员。主要研究方向为城市生态环境与可持续发展。E-mail: suweici@sina.com。

随着岩溶地区社会经济的发展，水资源利用量和废污水排放量不断增加，加之水资源的时空差异，使水资源与社会经济的关系日渐失调。因此，如何发挥区域水资源利用的最大社会、经济和生态效益，提高水资源利用率，实现水资源利用与社会、经济“此消彼长”式的发展，成为水资源可持续利用领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。经济合作与发展组织（OECD）提出的脱钩理论为水资源与社会经济发展关联性定量化评价提供了一种有效方法。以“脱钩”来表示二者关系的分离，即实现经济效益提升与资源消耗下降的非同步式发展<sup>[3]</sup>。20世纪末，OECD和芬兰学者Tapio将脱钩评价模型引入到农业发展研究，并逐步拓展到资源、环境、碳排放等领域<sup>[4-6]</sup>。21世纪以来，我国学者也逐渐将多种脱钩指数应用于水资源与社会经济发展脱钩分析，并取得了一系列重要成果。如张陈俊利用EUK理论检验用水量与经济增长的相关性<sup>[8]</sup>；谷学明根据OECD的脱钩理论评价水足迹与社会经济发展的脱钩状态<sup>[9]</sup>；王丽娜根据Tapio弹性指数分析经济发展与水环境压力的关系<sup>[10]</sup>；雷洁利用IPAT方程建立经济发展与污水排放的脱钩分析方法等，实现了从不同的视角，不同的脱钩模型分析水资源与社会经济发展的脱钩状况，进一步揭示出水资源与社会经济的协调性<sup>[11]</sup>。

以往的研究表明，水资源与社会经济的脱钩分析多从水足迹（用水量）或污水排放量的单一角度，从水生态足迹综合视角的研究较少，本文结合岩溶地区水生态足迹—经济发展的系统特征（图1），在论证不同模型的优缺点及其适用性的基础上，从水生态足迹的角度评价贵阳市2002—2014年水资源利用与经济发展的脱钩态势，为实现贵阳市水资源与社会经济协调、可持续发展的目标提供决策参考。

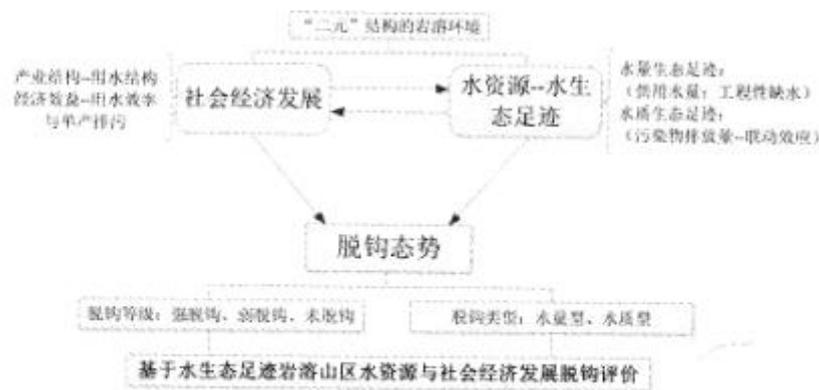


图1 水生态足迹与经济发展耦合系统框架  
Fig.1 Coupling system framework of water ecological footprint and economic development

## 1 脱钩评价模型

以水生态足迹与经济发展水平的脱钩状况来表征水资源与经济发展的脱钩态势，能整体分析水资源与经济发展的相关性。根据脱钩理论提出经济增长与水生态足迹之间存在两种相关性：水生态足迹随着经济增长而增加，称为耦合；水生态足迹并没有随着经济增长而增加，反而减少，称为脱钩。脱钩又可分为相对脱钩和绝对脱钩<sup>[12]</sup>，前者是指经济增长时，水生态足迹以较低比率增长；后者指经济增长的同时，水资源利用压力的增长率减少。依据不同脱钩评价模型可将脱钩层次分为强、弱（负）脱钩、衰退性脱钩和扩展性（负）脱钩等。本文引入资源环境领域的脱钩模型用于水生态足迹与经济发展的脱钩分析，主要有以下几种模型：

①Vehmas 脱钩指数<sup>[14]</sup>（综合分析法）。Vehmas 脱钩指数亦称综合指数法，主要是综合水生态足迹（WEF）经济增长以及单位 GDP 水生态足迹等指标来判定脱钩层次与脱钩类型，其脱钩层次与脱钩类型的判定方法（表 1）中， $\Delta WEF$ 、 $\Delta GDP$  分别代表评价时段起始增量， $\Delta (WEF/GDP)$  为单位 GDP 水生态足迹增量。

**表 1 Vehmas 指数脱钩程度判定标准<sup>[14]</sup>**  
**Tab.1 Determination criterion of Vehmas exponent decoupling degree<sup>[14]</sup>**

脱钩层次	$\Delta GDP$	$\Delta WEF$	$\Delta(WEF/GDP)$
强负脱钩(复钩)	<0	>0	>0
弱负脱钩(复钩)	<0	<0	>0
扩张性负脱钩(复钩)	>0	>0	>0
强脱钩	>0	<0	<0
弱脱钩	>0	>0	<0
衰退性脱钩	<0	<0	<0

②OCED 脱钩因子<sup>[3]</sup>。OECD 的报告《Indicators to measure decoupling of environmental pressures from economic growth》中阐述了脱钩指数分析方法，援引至此形成水生态足迹与 GDP 脱钩评价计算公式：

$$O_{\beta} = 1 - \frac{(WEF/GDP)_t}{(WEF/GDP)_{t-1}} \quad (1)$$

式中： $O_{\beta}$  为第 t 期水生态足迹与经济成长的脱钩因子，取值范围为  $(-\infty, 1]$ ；WEF 为  $[t-1, t]$  时段水生态足迹总量，代表水资源利用压力；GDP 代表对应时段经济发展的驱动力。当脱钩因子的值为  $(-\infty, 0]$  时属于非脱钩状态，而脱钩因子为  $(0, 1]$  时，则认为在评价期内发生了脱钩。

③Tapio 弹性指数<sup>[15]</sup>。Tapio 弹性指数主要是利用弹性来测度脱钩程度，其最早是用于交通与 GDP 脱钩的分析一种脱钩测度方法。本研究将水生态足迹代替交通压力，转化成如下计算公式：

$$T_{\beta} = \frac{\% \Delta WEF}{\% \Delta GDP} = \frac{(WEF_t - WEF_{t-1})/WEF}{(GDP_t - GDP_{t-1})/GDP} \quad (2)$$

式中： $T_{\beta}$  为脱钩弹性指数；t-1、t 为脱钩因子测算年份始末。其脱钩程度判定标准如图 2。

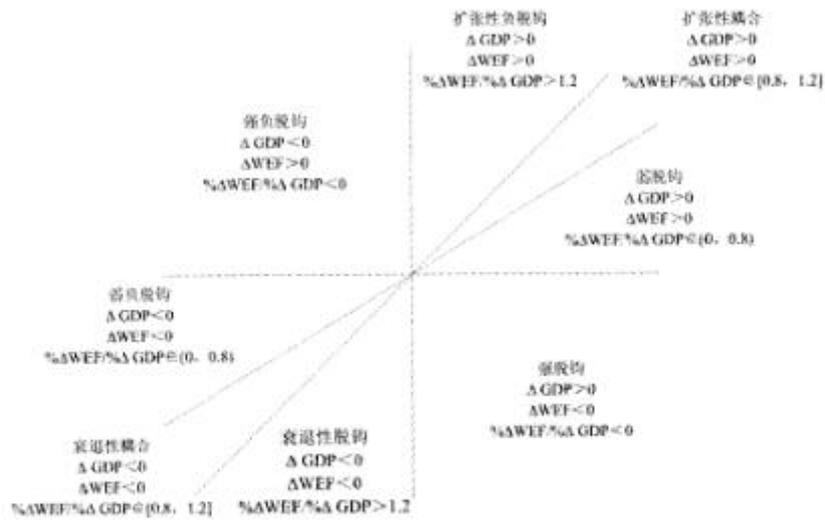


图2 Tapio弹性指数脱钩程度判定标准<sup>[7]</sup>

Fig.2 Decoupling degree criterion of Tapio elastic index<sup>[7]</sup>

④IGT 脱钩方程<sup>[17]</sup>：

$$I_r = \frac{T_n^1}{G_n^1} \times (1 + G_n^1) \quad (3)$$

式中： $I_r$  为水资源消耗与经济脱钩指数； $G_n^1$  代表从基准年到其后第  $n$  年 GDP 的年均增长率； $T_n^1$  为同时期内 GDP 水资源负荷的平均下降率，其表达式为水资源消耗量与 GDP 的比值变化率。脱钩状态判定准则见表 2。

表 2 不同脱钩状态下的  $I_r$  值<sup>[17]</sup>

Tab.2  $I_r$  value under different decoupling state<sup>[17]</sup>

脱钩状态	$\Delta GDP > 0$	$\Delta GDP < 0$
绝对脱钩	$I_r \geq 1$	$I_r \leq 0$
相对脱钩	$0 < I_r < 1$	$0 < I_r < 1$
未脱钩	$I_r \leq 0$	$I_r \geq 1$

⑤EKC 曲线。环境库兹涅茨曲线是通过人均 GDP 与环境污染指标之间的演变模拟，尝试用倒“U”形曲线描述经济发展对水生态环境的影响，其曲线拐点的到来是判定经济增长与水生态环境是否脱钩的依据。

$$K_{\beta} = \beta_0 + \beta_1 K_{\beta t} + \beta_2 K_{\beta t}^2 + \varepsilon_{\beta} \quad (4)$$

式中： $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为待定参数； $\varepsilon$  为随机误差修正值； $f$ 、 $t$  分别为研究区域和年份。若  $\beta_1 > 0$  且  $\beta_2 < 0$ ，则说明二者有脱钩的趋势，脱钩的临界值为  $-\beta_1 / 2\beta_2$ 。即若  $K \geq -\beta_1 / 2\beta_2$ ，二者已经脱钩，反之则未脱钩。

上述五种模型作为评价水生态足迹与社会经济发展脱钩程度的定量化方法，从不同角度分析各个区域或部门水资源投入与产出的脱钩态势，为社会经济发展提供决策参考。本文选取Vehamas脱钩模型、Tapio弹性指数、OCED脱钩因子、IGT脱钩因子、EKC曲线等5种模型对贵阳市2003—2014年（2002为基期年）的水资源利用与经济发展脱钩态势进行实证研究，分析不同脱钩模型对岩溶地区水生态足迹与经济脱钩态势评价的适用性，为选取脱钩评价模型提供确切依据。

## 2 实证研究与分析

### 2.1 数据来源与处理

数据主要来源于2002—2014年《贵阳市统计年鉴》《贵阳市水资源公报》《贵阳市环境状况公报》和《贵阳市国民经济与社会发展统计公报》。为避免历年GDP产值受价格因素的影响，以2002年为基期年，采用平减指数法换算成可比价格后核算GDP年增长率。在水生态足迹计算中，水资源的全球均衡因子 $r_w$ 、水资源平均产水能力 $p_w$ 。其中， $r_w$ 采用WWF2000年核算的全球水资源均衡因子，取5.19；另根据《地表水环境质量标准》（GB3838—2002）中规定的III类水质中COD、氨氮的质量浓度分别不超过20、1.0mg/L，计算出全球水域COD、氨氮的平均消纳能力分别为0.0629、0.0031t/hm<sup>2</sup><sup>[19-20]</sup>。

### 2.2 水生态足迹与经济发展脱钩分析

#### 2.2.1 水生态足迹历年变化特征

水生态足迹除涵盖经济发展所消耗的水资源量外，还将废污水污染物排放量纳入核算中，故水生态足迹核算分为水量生态足迹和水质生态足迹两部分，其中，水质生态足迹选取水体主要污染物COD和氨氮作为核算指标，通过污染物的平均消纳能力折算出水质生态足迹，见表3。

根据贵阳市2002—2014年水生态足迹核算结果（表3）可以看出，贵阳市历年人均水生态足迹总体呈持续波动变化趋势，单位GDP水生态足迹则持续下降。水量生态足迹中，工业用水生态足迹平均比重达50.63%，其次是农业用水平均比重达28.17%，剩下的生活、生态用水比重仅有20%左右，属以工业为主导水量生态足迹。农业用水生态足迹在2002—2012年基本呈持续下降趋势。生活用水在2011—2014年出现大幅上升；生态用水变化不明显。水质生态足迹中，COD水生态足迹呈小幅波动式下降趋势，但2011—2014年有持续小幅度上升态势；氨氮水生态足迹则出现剧烈的波动式变化，特别是2010—2014年间，其水生态足迹从2010年的5.86 Mhm<sup>2</sup>上升至2014年的10.045Mhm<sup>2</sup>，将近增长一倍的比率，年增长率达15.91%。

表3 2002—2014年贵阳市水生态足迹变化特征  
 Tab.3 The change characteristics of water ecological footprint in Guiyang (2002-2014)

年份	水量生态足迹/Mhm <sup>2</sup>				水质生态足迹/Mhm <sup>2</sup>		人均水生态足迹 (hm <sup>2</sup> /人)	单位GDP水生态足 迹(hm <sup>2</sup> /万元)
	工业用水	农业用水	生活用水	生态需水	COD	氨氮		
2002	0.752	0.638	0.339	0.020	4.192	6.864	3.698	3.806
2003	0.846	0.564	0.291	0.020	4.596	7.534	3.972	3.644
2004	1.506	0.583	0.296	0.020	4.777	7.869	4.290	3.475
2005	1.375	0.603	0.304	0.020	4.761	7.701	4.210	2.746
2006	1.319	0.570	0.307	0.021	4.117	7.032	3.771	2.217
2007	1.144	0.569	0.316	0.021	4.233	6.864	3.654	1.883
2008	0.889	0.471	0.317	0.021	4.299	6.697	3.488	1.618
2009	0.846	0.511	0.309	0.023	4.142	6.864	3.459	1.278
2010	0.906	0.455	0.312	0.023	4.093	5.860	3.122	1.049
2011	0.792	0.435	0.420	0.031	3.655	8.706	3.195	1.069
2012	0.783	0.417	0.430	0.040	3.598	8.538	3.101	0.861
2013	0.747	0.488	0.469	0.023	3.639	9.523	3.293	0.750
2014	0.674	0.560	0.659	0.021	3.944	10.045	3.491	0.670

注:单位“Mhm<sup>2</sup>”为“million hm<sup>2</sup>”的缩写。

### 2.2.2 不同脱钩模型评价比较

根据Vehamas 脱钩模型、Tapio 弹性指数、OCED脱钩因子、IGT脱钩因子、EKC曲线等4种脱钩评价模型的计算步骤,得出不同评价模型下的贵阳市2002—2014年水生态足迹与经济发展脱钩评价结果(表4,图3),为实证研究不同评价模型的适用性奠定基础。

表4 不同脱钩模型的脱钩评价价值和脱钩层次  
 Tab.4 Decoupling evaluation and decoupling level of different decoupling models

年份	脱钩指数				脱钩层次			
	Vehmas	Tapio	IGT	OCED	Vehmas	Tapio	IGT	OCED
2002—2003	0.003	0.628	0.710	0.013	扩张性负脱钩	弱脱钩	相对脱钩	绝对脱钩
2003—2004	-0.008	0.633	0.719	-0.072	弱脱钩	弱脱钩	相对脱钩	相对脱钩
2004—2005	-0.021	-0.131	-0.150	-0.208	强脱钩	强脱钩	未脱钩	相对脱钩
2005—2006	-0.020	-0.644	-0.738	-0.267	强脱钩	强脱钩	未脱钩	相对脱钩
2006—2007	-0.011	-0.104	-0.121	-0.174	强脱钩	强脱钩	未脱钩	相对脱钩
2007—2008	-0.011	-0.262	-0.297	-0.206	强脱钩	强脱钩	未脱钩	相对脱钩
2008—2009	-0.005	0.000*	0.000*	-0.113	弱脱钩	弱脱钩	相对脱钩	相对脱钩
2009—2010	-0.013	-0.577	-0.659	-0.355	强脱钩	强脱钩	未脱钩	相对脱钩
2010—2011	0.006	1.200	1.405	-0.023	扩张性负脱钩	扩张性耦合	绝对脱钩	相对脱钩
2011—2012	-0.008	-0.105	-0.121	-0.258	强脱钩	强脱钩	未脱钩	相对脱钩
2012—2013	-0.004	0.491	0.569	-0.131	弱脱钩	弱脱钩	相对脱钩	相对脱钩
2013—2014	-0.003	0.490	0.559	-0.121	弱脱钩	弱脱钩	相对脱钩	相对脱钩

注:0.000\*代表该数值小于0.001。

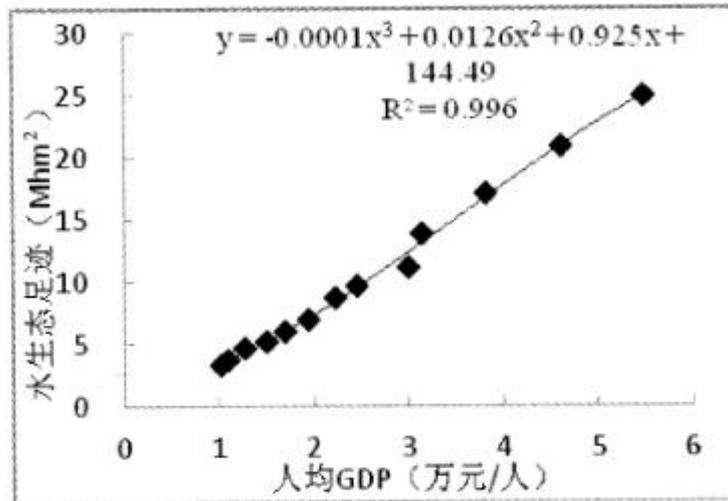


图3 水生态足迹与人均GDP的EKC回归曲线  
Fig.3 EKC regression curves of water ecological footprint and per capita GDP

#### 2.2.2.1 Vehmas脱钩指数与Tapio弹性指数

从表3 的划分结果和计算过程可以看出, Vehmas 脱钩指数与Tapio 弹性指数评价结果基本一致, 但Vehmas在2002—2003年的评价结果为扩张性负脱钩, 而Tapio弹性指数评价结果为弱脱钩, 而该时段贵阳市水生态足迹和GDP的增长率为分别为8.168%和13%, 两者比值为0.628, 表明贵阳市水生态足迹的增速低于GDP的增速, 单位GDP的水生态足迹量也下降0.242hm<sup>2</sup>, 故评判为弱脱钩更合理。另外, 在2010—2011年期间, Vehmas脱钩指数与Tapio弹性指数评价结果分别为扩张性负脱钩与扩张性耦合, Vehmas 脱钩指数以 $\Delta(WEF/GDP)=0$ 为界, 忽略了脱钩层次差异性, 且此时单位GDP生态足迹上升了0.02hm<sup>2</sup>, 处于耦合状态, 若判定为扩张性负脱钩则明显不科学。

上述表明, Vehmas脱钩指数对脱钩评价而言, 虽具有简单明了、可操作性强、判定标准与定义一致等优点, 但该测度体系没有把各种脱钩层次之间的临界状态加以考虑。而基于Vehmas脱钩指数基础上改进的Tapio 弹性评价方法将弹性指数 $[0.8, 1.2]$ 划分成衰退性耦合和扩张性耦合区间, 即为了避免将轻微变化过度解释为显著变化, 将弹性指数 $\in [0.8, 1.2]$ 的评价值独立划成耦合区域<sup>[21]</sup>, 使评价结果更具客观性、科学性。

#### 2.2.2.2 OECD脱钩因子与IGT方程

结合表3 可知, 两种方法的评判标准基本一致, 但评价结果差别较大。OECD脱钩因子与IGT方程根据其定义的脱钩指数只能分辨出脱钩与未脱钩、绝对与相对脱钩, 只是单纯的划分出脱钩状态, 而无法分辨出脱钩程度。另外, 在经济衰退时期, 也有可能出现脱钩指数在(0, 1)之间, 与Vehmas脱钩指数与Tapio弹性指数相比, 也无法将衰退性脱钩和扩张性负脱钩区分出来, 也无法满足对水生态足迹与社会经济发展的脱钩态势精细划分的要求。

#### 2.2.2.3 EKC曲线

EKC曲线通过回归分析得到水生态足迹与人均GDP之间的函数关系，然后根据有关的系数来判定是否发生了脱钩，这比前面所提到的弹性分析法更为精细，但采取这一方法对数据量的要求比较高，在统计数据缺乏的情况下，此方法的应用会受到很大限制。从图3的回归结果来看，大多数年份水生态足迹与人均GDP关联密切，显著性达0.996，曲线均位于第一象限的下半幅，但从两者增长率变化趋势（图4）可以看出，水生态足迹增长率趋于下降，人均GDP增长率趋于上升，脱钩态势总体上处于弱脱钩与强脱钩的过渡阶段，这也证明Tapio弹性指数对脱钩态势评价的准确性。

综上所述，Tapio弹性指数法对贵阳市水生态足迹与经济脱钩评价，不仅对脱钩态势评判准确，对历年水生态足迹与GDP具有较好的辨识性，精细地反映出不同脱钩态势的水生态足迹变化特征，且对数据量要求不高。由于Vehmas脱钩指数、OCED脱钩因子、IGT方程和EKC曲线不具备上述优势，故选用Tapio弹性指数法最适宜对贵阳市水生态足迹与经济脱钩态势评价。

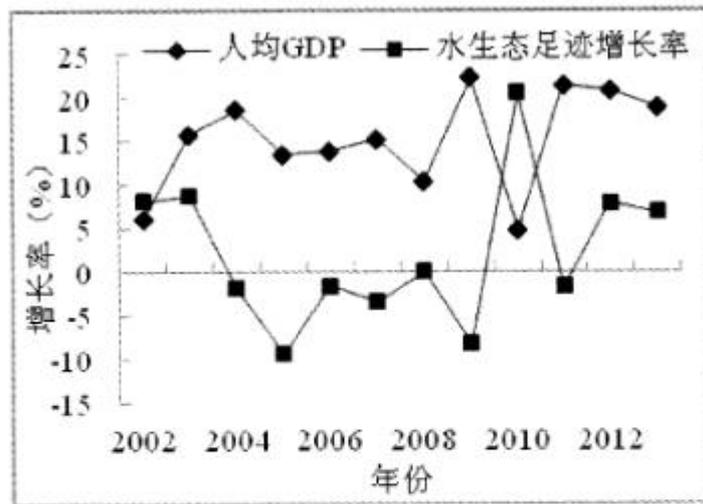


图4 水生态足迹与人均GDP的历年增长率  
 Fig.4 The growth rate of water ecological footprint and the per capita GDP over the years

### 2.2.3 基于Tapio弹性指数的脱钩态势评价

根据水量生态足迹、水质生态足迹与经济脱钩的Tapio脱钩指数核算结果（表5），以“短板效益”为原则，即选取脱钩程度低的指标作为贵阳市水生态足迹与经济脱钩评价结果，从而得到脱钩类型与层次。

由表5可知，2003—2014年贵阳市水生态足迹与GDP增长率的脱钩指数波动性较大，以水质与经济发展的脱钩指数为例，2006年强脱钩指数为-0.717，而2011年扩张性负脱钩指数达1.415。脱钩层次主要呈现3种状态：强脱钩、弱脱钩和拓展性负脱钩，其分别占总评价期数的55.56%、38.89%和5.55%。其中，水量生态足迹与经济脱钩指数全部为强、弱脱钩，说明水资源利用量与经济脱钩态势已经进入到相对稳定的状态。而水质、水生态足迹与经济脱钩态势除2011年为扩张性负脱钩外，其余年份也是强、弱脱钩的状态。

表5 2002—2014年贵阳市水资源与经济发展脱钩态势评价  
 Tab.5 The decoupling trend evaluation of water ecological footprint and economic development in Guiyang (2002—2014)

年份	GDP增长率(%)	Tapio脱钩指数		脱钩层次		脱钩类型与层次
		水量生态足迹	水质生态足迹	水量生态足迹	水质生态足迹	
2003	13.0	-0.124	0.747	强脱钩	弱脱钩	水质型弱脱钩
2004	13.7	2.903	0.311	弱脱钩	弱脱钩	水质型弱脱钩
2005	14.6	-0.293	-0.100	强脱钩	强脱钩	水质型强脱钩
2006	14.7	-0.248	-0.717	强脱钩	强脱钩	水量型强脱钩
2007	15.8	-0.481	-0.029	强脱钩	强脱钩	水量型强脱钩
2008	13.1	-1.305	-0.070	强脱钩	强脱钩	水量型强脱钩
2009	13.3	-0.044	0.007	强脱钩	弱脱钩	水质型弱脱钩
2010	14.3	0.027	-0.670	弱脱钩	强脱钩	水量型弱脱钩
2011	17.1	-0.063	1.415	强脱钩	扩张性负脱钩	水质型扩张性负脱钩
2012	15.9	-0.031	-0.115	强脱钩	强脱钩	水量型强脱钩
2013	16.0	0.217	0.529	弱脱钩	弱脱钩	水质型弱脱钩
2014	13.9	0.782	0.452	弱脱钩	弱脱钩	水量型弱脱钩

#### 2.2.4 脱钩成因分析

从表5可以看出，在整个研究期内，除2008—2014年受全球经济危机的影响，GDP增速出现小幅波动下降外，贵阳市GDP增长率始终保持相对稳定的水平，其变化范围介于13.1%~17.1%，平均GDP增长率为14.61%，而水量、水质生态足迹的增长率却变幅较大，故其直接决定了水生态足迹与经济脱钩程度。如图5所示，水量生态足迹在2003—2004年增长速度最快，增长率达39.76%，脱钩指数为2.903，2007—2008年却呈现快速下滑，下降率达17.10%，变化幅度达56.86，其整体上呈先上升后下降、再上升的变化特征。究其原因有两点：①贵阳市水资源利用结构以工业用水为主导，其平均比重达51.34%，工业用水量决定贵阳市总用水量的变化，集中表现在2002—2008年间水量生态足迹变化率随着工业用水量的变化而变化。②随着贵阳市工业用水量的下降和城乡生活用水量的增加，生活用水量逐渐成为影响水量生态足迹变化的主导因素，且在未来的用水结构中，生活用水量将成为城市最主要的用水部门，如2009—2014年水量生态足迹的变化率随着生活用水量的变化而变化，2014年生活用水量已与工业用水量基本持平，并有超越工业用水量成为第一大用水部门的趋势。这也说明水资源利用结构直接关系到水资源与经济脱钩态势。

如图6所示，2002—2014年贵阳市COD与氨氮排放量相对平稳，但水质生态足迹增长率呈现出明显的波动特征，除2003—2004、2008、2013—2014年水质生态足迹有所增长外，其余年份水质生态足迹则呈下降趋势，其中2006年为下降率最高的年份，2011年为上升率最高的年份，其升降率分别为-10.54%、24.20%。COD排放量与水质生态足迹增长率基本不成相关性，但氨氮排放量的小幅增减，却会导致水质生态足迹增长率的剧烈变化。从历年氨氮排放量发现，其与水质生态足迹增长率基本呈正相关，且相关指数达0.601。2002—2007年，COD和氨氮的排放量经历了先上升后下降的过程，此时水质生态足迹增长率呈持续下降的趋势；2008—2009年两者排放趋于稳定，水质生态足迹变化相对不明显；2010—2014年氨氮排放量的持续上升，COD排放量趋于下降，但氨氮排放量的波动变化直接导致水质生态足迹增长率呈波动上升趋势。由于90%以上的COD和氨氮排放量来源于生活污水，工业废水排放源主要是化工、金属冶炼、食品加工和采选业等行业。因此，水质生态足迹增长率的主要影响因子是城乡生活污水的排放量，特别是人口密集的中心城区云岩区和南明区，生活污水属于面源污染，污水不经处理直接排放到地表、地下河网，对城市水生态环境造成严重的威胁。

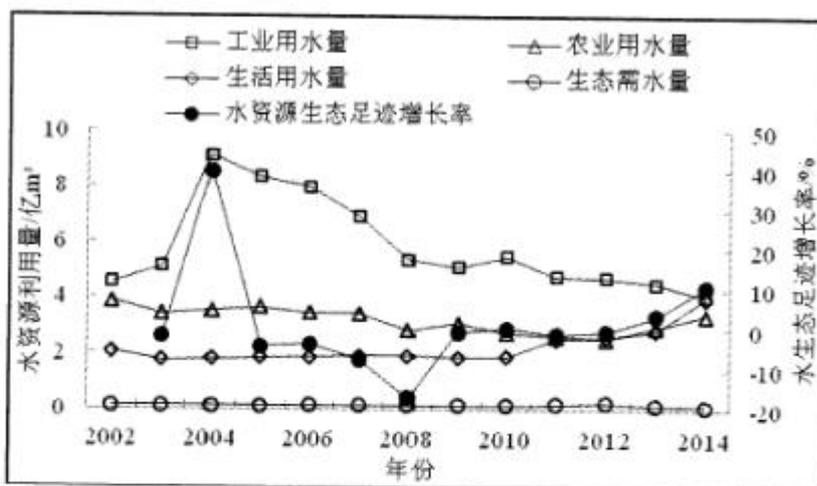


图5 贵阳市2002—2014年用水结构与水量生态足迹的相关性

Fig.5 The relevance between water utilization structure and ecological footprint in Guiyang (2002–2014)

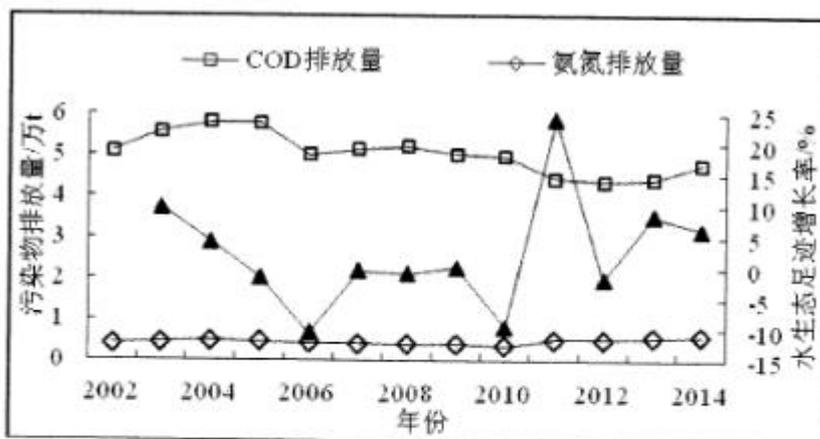


图6 贵阳市2002—2014年水体污染物排放量与水质生态足迹的相关性

Fig.6 The relevance between pollutants emission and water environment ecological footprint in Guiyang (2002–2014)

### 3 结论

第一，2002—2014年贵阳市水生态足迹与经济发展基本呈强、弱脱钩态势（2011年为扩张性负脱钩），根据不同的脱钩项目可划分成水量型与水质型脱钩，两者平均脱钩指数分别为0.112和0.147。由于贵阳市历年GDP增长率稳定于13.1%~17.1%，而水资源、水质生态足迹的波动幅度大，导致其脱钩指数也呈现出明显的波动性变化。另外，随着贵阳市人口的集聚，工业用水

---

量、污水排放量的下降，生活用水比重上升，未来生活用水量和生活污水排放量将对全市水生态足迹与经济脱钩程度产生重大影响。

第二，水生态足迹为分析水资源与经济脱钩性提供了一种全面、科学的研究视角，相比于水足迹，不仅能综合考虑经济发展对水资源占用和水质污染的影响率，也可从生态占用的角度分析水资源利用效率、方式与经济发展的协调性，弥补单纯考虑水资源消耗量的缺陷。因此，只有经济发展与水质、水量同时脱钩，才能实现水资源与经济的可持续发展。

第三，依据不同模型在脱钩层次划分上的判定差异（表4，图3）可以看出，OCED脱钩因子、IGT方程只能将水资源与社会经济的脱钩程度划分成绝对脱钩、相对脱钩和未脱钩3类，不能就不同的水资源消耗程度与经济增长关系进行划分，导致脱钩态势分类过于粗略而不明确。Eku曲线主要是对水资源消耗与经济增长进行回归分析，不能量化分析经济发展与水源的脱钩程度。Vahmas指数易对水资源与经济发展同时增长或下降的情况产生误评（2002年），而Tapio脱钩模型综合了数量和变率两种思想，有效地避免了上述其它模型评价结果随意性，提高了模型测度的科学性和准确性。

#### 参考文献：

- [1] 左其亭, 陈曦. 面向可持续发展的水资源规划与管理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] 吴佩林. 我国区域发展的水资源压力分析 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(10): 143 - 149.
- [3] OECD. Indicators to Measure decoupling of environmental pressure from economic growth [R]. Paris: OCED, 2002.
- [4] UNEP. Exploring Element for A Work Plan (2008-2010): Background Papers for the International Panel for Sustainable Resource Management [R]. Budapest, Hungary, Hungarian ministry of environment&Water Building, 2007.
- [5] 于忠华, 李文青, 刘海滨, 等. 快速发展地区经济增长与资源环境协整性分析——以南京为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(10): 1 698 - 1 704.
- [6] 王君华, 李霞. 中国工业行业经济增长与CO2排放的脱钩效应 [J]. 经济地理, 2015, 35(5): 105 - 110.
- [7] Tapio P. Towards A Theory of Decoupling: Degrees of Decoupling in the EU and the Case of Road Traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137 - 151.
- [8] 张陈俊, 章恒全, 陈其勇, 等. 用水量与经济增长的实证关系研究 [J]. 资源科学, 2015, 37(11): 2 228 - 2 239.
- [9] 谷学明, 王远, 赵卉卉, 等. 江苏省水资源利用与经济增长关系研究 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(2): 351 - 358.
- [10] 王丽娜, 杨林娇, 张彩虹, 等. 辽宁省经济发展与水环境压力脱钩关系研究 [J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2015, 17(5): 8 - 11.
- [11] 雷洁, 雷菁, 徐成剑. 经济发展与污水排放的脱钩分析——以武汉市为例 [J]. 中国农村水利水电, 2014(1): 96 - 98.

- 
- [12] 潘安娥, 陈丽. 湖北省水资源利用与经济协调发展脱钩分析——基于水足迹视角 [J]. 资源科学, 2014, 36(2): 328 - 333.
- [13] 赵一平, 孙启宏, 段宁. 中国经济发展与能源消费响应关系研究——基于相对脱钩与复钩理论的实证研究 [J]. 科研管理, 2006, 27(3): 128 - 134.
- [14] Vehmas J, Kaivo-oja J, Luukkanen J. Global Trends of Linking Environmental Stress and Economic Growth [R]. Turku: Finland Futures Research Centre, 2003: 6 - 9.
- [15] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用脱钩态势评价与展望 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 46 - 54.
- [16] Duarte R, Pinilla V, Serrano A. Is There An Environmental Kuznets Curve for Water Use? A Panel Smooth Transition Regression Approach [J]. Economic Modelling, 2013, 31: 518 -527.
- [17] 陆钟武, 王鹤鸣, 岳强. 脱钩指数: 资源脱钩、废物排放与经济增长的定量表达 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 33(1): 2 -9.
- [18] 汪奎, 邵东国, 顾文权, 等. 中国用水量与经济增长的脱钩分析 [J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 34 - 38.
- [19] 张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析 [J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4 111 - 4 124.
- [20] 李健, 张吉辉. 天津市水资源足迹趋势预测与动态调节 [J]. 地域研究与开发, 2011, 30(5): 131 - 134.
- [21] 钟太洋, 黄贤金, 韩立, 等. 资源环境领域脱钩分析研究进展 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1 400 - 1 412.