

城市扩张对水资源和水环境的脱钩关系研究

——以南宁市岩溶含水层保护性开发为例

黄之巍, 黄春阳*, 吴朋青, 梁爽, 谢维安

(广西壮族自治区地质调查院, 南宁 530023)

摘要:当前我国依然处于城市建设与扩张的重要阶段,平衡城市发展与环境保护关系对城市稳定发展影响较大。如何在满足城市发展需求、维持城市持续稳定发展的同时,避免城市发展对周围区域岩溶含水层造成较大的干扰与破坏,保持含水层的结构稳定,是当前城市发展中必须着重解决的问题。本研究通过对比城市扩张导致的水使用量增加以及水污染增加对岩溶含水层造成的扰动,从实现需求增加与岩溶含水层干扰脱钩角度出发,提出通过脱钩措施避免城市扩张对岩溶含水层造成过大扰动。最后以南宁市为案例,就如何实现降低扰动进行了案例以及数据的具体分析。

关键词:城市扩张;岩溶含水层;生态足迹;脱钩

中图分类号:P641.134

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)12-0097-7

0 引言

城市扩张对城市水资源的影响必须得到充分重视。尤其在岩溶含水层条件下,岩溶含水层结构稳定性更低,大规模抽取地下水以满足城市用水需求,会导致岩溶区地下水位显著下降。这种人为干预可能引发岩溶塌陷、地裂等地质灾害,同时破坏含水层与地表水体的水力联系。此外,城市污水渗入断裂含水带后,污染物会随重力水快速迁移,尤其在张性断裂带中扩散范围更广。在城市扩张过程中,必须尽量避免对含水层造成干扰,本研究以南宁市为例,对城市扩张的干扰情况以及通过哪些因素的控制能够避免城市扩张,对含水层进行干扰等相关问题进行分析论述。

1 城市扩张与岩溶含水层干扰效应的脱钩模型

以城市经济增长情况为主要参考,衡量城市

扩张与岩溶含水层干扰关联,即城市扩张是否能够与岩溶含水层的干扰现象脱钩,可以提出如下两种假设:①随着城市扩张、经济发展,水生态足迹应当呈现增长趋势;②随着城市扩张、经济发展,水生态足迹不仅并未呈现增长趋势,反而出现了下降,该情况一般称为城市扩张与岩溶含水层干扰效应的脱钩。前者表明城市的扩张导致了更大的干扰效应,并使得城市用水压力不断增加;后者表明城市扩张与含水层干扰不再存在直接关联,岩溶含水层的干扰不会因城市扩张而加大。为判断城市扩张(主要从经济增长角度出发)与水生态足迹的脱钩情况,即根据水生态足迹判断含水层的受干扰表现,可分别使用 Vehmas 脱钩指数模型、OCED 脱钩因子模型、Tapio 弹性指数模型、LGT 脱钩指数、EKU 曲线或综合利用这几个主要模型进行分析。

本文采用 Tapio 弹性指数模型。

基金项目:广西科技重大专项项目“中国-柬埔寨典型岩溶关键带碳循环过程对比研究与应用示范”(桂科 AA24206020);广西矿山水文地质勘查评价关键技术研究人才小高地(桂地矿综研[2024]6号);广西地质矿产勘查开发局局部门前期项目(GXDK202405);广西地下河流域系统及其开发利用条件调查(GXDK202418)。

$$T_{f_t} = \frac{\% \Delta L / L}{\% \Delta K / K} = \frac{(L_t - L_{t-1}) / L}{(K_t - K_{t-1}) / K} \quad (1)$$

该模型中, T_{f_t} 为该地区的脱钩弹性指数。由于在弹性指数模型中,任何微小的变化均能够导致数据的大幅改变,因此在本研究中根据 Tapio 的脱钩判断原则,脱钩判定的临界点设定为 $[0.8, 1.2]$,即在本研究中只有指数小于 0.8 才能被认定为脱钩。

2 实验研究

本研究以南宁市为研究对象,选取了南宁市 2012 年-2024 年水资源利用以及城市扩张相关数据,其中城市扩张主要根据城市经济发展相关数据进行分析。根据水生态足迹的核算方法,并采用 Tapio 弹性指数模型对上述数据进行分析。其中,水生态足迹主要根据用水量以及水体污染总量两个主要参数进行分析。

2.1 数据来源与处理

本研究选用的所有数据均来自国家统计局官方网站的《南宁市统计年鉴》《南宁市水资源公报》等统计资料提供的数据,并根据研究需求对原始数据进行处理。由于本研究在城市扩张分析数据中大量引用经济增长数据作为辅助,为避免数据受价格波动影响,在本研究中以 2012 年为基期年,通过平均指数算法对数据进行了处理。采用 r_w 表示水资源的全球均衡因子, P_w 表示生产能力,根据 WWF2010 年核算数据,取值 5.19;本研究水资源污染与破坏情况参考的标准为国家《地表水质量标准》,其中 III 类水 COD 不超过 20mg/L、氨氮含量不超过 1.0mg/L,根据该数据全球水域 COD 吸收量为 0.0629t/hm²,氨氮为 0.0031t/hm²。

2.2 城市扩张与岩溶含水层干扰效应的脱钩分析

2.2.1 岩溶含水层干扰效应的变化分析

水资源的利用与城市扩张关系主要体现在下述两个方面:①城市扩张将使得城市水资源的需求量以及使用总量增加;②城市扩张将带来更大的污染物排放量。因此,在水生态足迹的核算

中,不仅需要考虑到城市扩张对水资源利用量的影响,同时需要考虑到城市扩张造成的污染总量增加情况。根据现有数据,本研究主要根据 COD 以及氨氮两类污染物对水生态污染情况进行分析,核算的结果如表 1 以及表 2 所示。

表 1 统计周期内南宁市水资源生态足迹变化情况

年份	工业用水 /Mhm ²	农业用水 /Mhm ²	生活用水 /Mhm ²	生态用水 /Mhm ²
2012	0.752	0.638	0.339	0.020
2013	0.846	0.564	0.291	0.020
2014	1.506	0.583	0.296	0.020
2015	1.375	0.603	0.304	0.020
2016	1.319	0.570	0.307	0.021
2017	1.144	0.569	0.316	0.021
2018	0.889	0.471	0.317	0.021
2019	0.846	0.511	0.309	0.023
2020	0.906	0.455	0.312	0.023
2021	0.792	0.435	0.420	0.031
2022	0.783	0.417	0.430	0.040
2023	0.747	0.488	0.469	0.023
2024	0.674	0.560	0.659	0.021

表 2 统计周期内南宁市水环境生态足迹变化情况

年份	COD/Mhm ²	氨氮/Mhm ²
2012	4.192	6.864
2013	4.596	7.534
2014	4.777	7.869
2015	4.761	7.701
2016	4.117	7.032
2017	4.233	6.864
2018	4.299	6.697
2019	4.142	6.864
2020	4.093	5.860
2021	3.655	8.706
2022	3.598	8.538
2023	3.639	9.523
2024	3.944	10.045

根据现有统计分析结果表明,统计周期内人均水生态足迹处于波动状态,而单位 GDP 水生态足迹则呈现持续下降趋势,同时与水资源生态足迹相比,水环境生态足迹对水生态足迹的影响更显著。

水资源生态足迹的分析结果显示,工业用水在南宁市用水总量占比最高,超过 50%,本市农业用水的占比同样较高。该情况存在的主要原因是南宁市周围地区的含水层为岩溶含水层,该结构使得本市农业用水的集约度相对较低,农业用水总量难以得到有效控制。根据 2012 年到 2024 年南宁市水生态环境的总体变化情况,2012 年到 2014 年本市工业用水增长较为快速,2015 年至 2024 年本市工业用水的总量则表现出逐步下降的趋势,其年平均生产量下降约 0.083Mhm^2 。鉴于南宁市 2012 年至 2024 年工业规模以及工业区的规模处于不断增长阶段,因此能够认为 2015 年至 2024 年工业用水总量下降的主要原因是采用了合理措施处理工业污水,工业用水处理质量改善较为显著。农业用水的变化方面,2012 年至 2022 年南宁市农业用水总量下降较为显著,但 2023 年到 2024 年期间,南宁市农业用水量再一次上升至 0.56Mhm^2 ,与农业水平均值基本相同。本市农业用水生态足迹数据下降的主要原因,是新技术以及设备的应用使得农业生产用水需求大幅下降,而农业进入高质量发展阶段后,由于农业系统发生了结构变化,因此导致农业生态足迹进一步升高。生活用水方面,2012 年至 2024 年南宁市生活用水生态足迹的提升较为显著,数据变化与南宁市城市发展情况基本一致,该情况出现的主要原因是南宁市城市规模不断扩大,对周围地区的集聚作用进一步显著,由于生活在南宁市的居民不断增加,因此导致城市居民生活用水总量同样呈现出较为显著的增长趋势。

水环境生态足迹的分析结果显示,COD 水生态环境总体呈现波动下降趋势,其中 2022 年至 2024 年 COD 水生态环境数据则出现了小幅度的上升。与 COD 水生态环境数据变化情况相

比,氨氮水生态环境数据从 2020 年开始则表现出较为显著的上升趋势。该情况出现的可能原因是南宁市城市规模的扩大,使得长期稳定居住在南宁市的居民总量大幅增加,居民的生活用水带来了更多的氨氮污染物,并使得 COD 以及氨氮水生态数据出现了小幅增长。

通过对上述数据分析研究,可以初步得出如下结论:为实现南宁市城市扩张与水资源的脱钩,降低城市扩张对城市岩溶含水层的干扰,在减少工业用水的同时,随着居民数量的增加,只要有效控制生活用水量、提高生活用水的治理水平,就可以满足脱钩需求。

2.2.2 城市扩张与岩溶含水层干扰效应的脱钩态势

以 2012 年为基准,南宁市 2012 年至 2024 年水生态 Tapio 脱钩指数的计算结果如表 3 所示。

结果显示,2013 年至 2024 年南宁市水资源、水环境与城市经济增长与城市扩张情况的关联性变化较大。与水环境与城市扩张的关联为例,2016 年水环境与城市扩张呈强脱钩状态,强脱钩指数为 -0.717 ,而 2021 年水环境则处于扩张性脱钩即负脱钩状态,此时负脱钩指数则达到了 1.415 。将脱钩情况划分为强脱钩、弱脱钩以及扩张型脱钩三种主要类型,则三种类型的脱钩在本次研究统计结果中占比分别为 55.56% 、 38.89% 以及 5.55% 。根据统计结果,水资源与城市扩张的脱钩关系均为强脱钩或弱脱钩,该结果表明当前阶段,南宁市水资源利用与城市扩张已经进入相对稳定的状态。而水环境生态足迹以及水生态足迹与城市扩张的脱钩关系,除 2011 年为扩张性负脱钩关系外,其他统计年份同样均为强脱钩或弱脱钩。根据“短板效益”的基本原则,综合上述分析结果表明,南宁市城市扩张与水生态的脱钩关系中水资源的脱钩以强脱钩为主,水环境的脱钩等级则以弱脱钩为主,说明与水资源开发与利用相比,南宁市的城市扩张对本市水环境的影响更加突出,城市扩张导致的水体受污染是南宁市城市扩张过程中需要关

表 3 统计周期内南宁市水生态足迹与城市扩张脱钩情况

年份	当年 GDP 增长情况	Tapio 脱钩指数		脱钩评价	
		水资源生态足迹	水环境生态足迹	脱钩等级	脱钩类别
2013	10.3	-0.124	0.747	弱	环境
2014	11.2	2.903	0.311	弱	环境
2015	11.3	-0.293	-0.100	强	环境
2016	12.1	-0.248	-0.717	强	资源
2017	10.3	-0.481	-0.029	强	资源
2018	10.4	-1.305	-0.070	强	资源
2019	10.5	-0.044	0.007	弱	环境
2020	11.7	0.027	-0.670	弱	资源
2021	12.3	-0.063	1.415	扩张	环境
2022	11.6	-0.031	-0.115	强	资源
2023	11.3	0.217	0.529	弱	环境
2024	10.9	0.782	0.452	弱	资源

注的首要问题。

2.2.3 脱钩原因分析

根据南宁市 GDP 增长统计结果,除 2020 年前本市经济增长速度出现小幅下降外,其他时期南宁市 GDP 均表现出较为稳定的增长,且 GDP 增长率的变化幅度相对较小,按照国家统计局相关数据,本市 GDP 增长率的差异基本在 2% 左右。但根据水资源以及水环境生态足迹数据的统计结果,该数据的增长极为显著。根据表 2 可知,2013 年至 2014 年水资源生态足迹进入快速增长阶段,该阶段水资源生态足迹的增长率一度达到 39.76%,同时这个阶段水资源生态足迹与城市 GDP 增长以及城市扩张之间的脱钩指数同样达到了 2.903,2017 年至 2018 年南宁市水资源生态足迹则进行了快速下降阶段,下降阶段本市水资源生态足迹的下降率同样达到了 17% 以上。在不足五年时间内,南宁市水资源生态足迹的变化率超过了 50%。以表 3 统计获取的结果为基础,能够推测获取下述基本结论。

第一,工业用水是南宁市的主要用水,因此工业用水增长情况对水资源生态足迹存在较大的影响。2012 年后本市水资源生态足迹增长

较快的主要原因,是城市扩张以及城市工业体系的发展,因此导致工业用水总量增加较为显著(如表 4 所示)。根据表 4 可知,在 2012 年南宁市工业、农业、生活以及生态用水比例分别为 43.01%、36.48%、19.38% 以及 1.13% 的情况下,以前一年为基准,南宁市工业用水总量的变化情况与本市水资源生态足迹的变化趋势保持了基本一致。

第二,工业生产用水在南宁市水资源消耗总量中的占比不断降低,以及生活用水占比的不断升高,能够发现生活用水已经逐步成为影响南宁市水环境生态足迹的主要影响因素。根据表 4 的统计结果,生活用水的占比存在不断升高的趋势,根据 2024 年的统计数据,南宁市工业用水占比与生活用水占比已经基本一致且生活用水总量继续增加的趋势依然明显。该结果同样是南宁市水资源生态足迹与城市扩张脱钩趋势持续显著的主要原因,仅对水资源生态足迹的增长进行统计,在 2012 年南宁市工业、农业、生活以及生态用水量分别为 455Mhm²、386Mhm²、205Mhm²、12Mhm² 的情况下,以前一年为基准,得到的表 5 同样能够证明该结果。

表 4 南宁市用水结构变化

年份	工业用水 占比增长 /%	农业用水 占比增长 /%	生活用水 占比增长 /%	生态用水 占比增长 /%
2012	—	—	—	—
2013	6.17	-3.72	-2.47	0.02
2014	13.43	-8.5	-4.61	-0.33
2015	-2.87	1.95	0.89	0.04
2016	-0.28	-0.5	0.67	0.11
2017	-3.65	2.03	1.54	0.08
2018	-3.48	-0.02	3.28	0.21
2019	-2.23	2.51	-0.38	0.11
2020	3.31	-3.43	0.12	-0.01
2021	-6.22	-0.89	6.6	0.51
2022	-0.26	-0.96	0.72	0.51
2023	-3.68	3.28	1.44	-1.04
2024	-8.04	1.03	7.26	-0.25

表 5 南宁市用水结构与水资源生态足迹关系统计结果

年份	工业用水 增长率 /%	农业用水 增长率 /%	生活用水 增长率 /%	生态用水 增长率 /%
2012	—	—	—	—
2013	12.53	-11.66	-14.15	0.00
2014	77.93	3.52	1.70	0.00
2015	-8.67	3.40	2.63	0.00
2016	-4.09	-5.48	1.25	8.33
2017	-13.28	-0.29	2.69	0.00
2018	-22.25	-17.15	0.52	0.00
2019	-4.83	8.42	-2.60	7.69
2020	7.03	-11.00	1.07	0.00
2021	-12.59	-4.36	34.39	35.71
2022	-1.04	-4.18	2.36	26.32
2023	-4.64	17.06	9.23	-41.67
2024	-9.73	14.92	40.49	-10.00

而根据表 6 对 COD 以及氨氮污染物的统计,在 2012 年南宁市 COD 以及氨氮的排放量分别为 508Mhm²、410Mhm² 的情况下,以前一年为

表 6 南宁市水体污染物排放与水资源生态足迹关系统计结果

年份	COD/Mhm ²	氨氮/Mhm ²
2012	—	—
2013	9.65	9.76
2014	3.95	4.44
2015	-0.35	-2.13
2016	-13.52	-8.70
2017	2.81	-2.38
2018	1.56	-2.44
2019	-3.65	2.50
2020	-1.20	-14.63
2021	-10.69	48.57
2022	-1.58	-1.92
2023	0.92	11.76
2024	8.64	5.26

基准,能够明确 2012 年至 2024 年南宁市 COD 以及氨氮污染物的排放较为稳定,但同时本市水环境足迹却呈现出明确的波动特征。其中 2013 到 2014 年、2018 年、2023 到 2024 年几个时间段南宁市的水环境生态足迹出现了较为显著的增长,统计周期内其他年份水环境生态足迹均呈现下降状态,其中 2016 年生态足迹的下降最为显著。在统计周期内,南宁市水环境生态足迹的最大增长为 24.20%、最大下降则为-10.54%。分别对比 COD 排放、氨氮排放与水环境生态足迹的关联,COD 的排放量与南宁市水环境生态足迹基本不存在任何直接相关性,但氨氮排放量对水环境生态足迹却存在较为显著的影响,氨氮排放量的小幅度下降,导致水环境生态足迹的大幅改变,仅考虑氨氮排放量与水环境生态足迹的关联,两者的相关指数计算结果为 0.601。在本文的研究统计中,2012 年至 2017 年南宁市 COD 以及氨氮污染物的排放均呈现出先上升后下降的趋势,而这个阶段南宁市水环境生态足迹则整体表现出小幅上升的趋势;2020 年至 2024 年南宁市 COD 污染排放量表现出较为显著的下降,同一阶段氨氮污染物的排放存在一定波动,对该阶

段水环境生态足迹的统计显示,生态足迹表现出了波动上升的趋势。综合上述研究结果,根据水环境生态足迹的影响情况,南宁市需要加强生活用水的管控,并同时提高对污水中氨氮污染物排放的控制。

3 结论与讨论

(1) 根据统计结果,2012 年-2024 年南宁市 GDP 增长率在 10.3%-12.3%,期间南宁市常住人口从 2012 年约 700 万人增至 2024 年 897.19 万人,增长 28.2%;2020 年南宁市城镇化率达到了 71.9%,较 2012 年(约 60%)提升近 12%。统计结果显示,南宁市城市扩张与经济发展呈现显著的正相关。2012 年-2024 年南宁市城市扩张与用水量呈现出强、弱脱钩态势,城市扩张项目不同可以具体分为水资源以及水环境的脱钩,两者的平均指数分别为 0.112 以及 0.147。南宁市水资源以及水环境的波动与城市经济发展、城市扩张的波动基本一致。此外,根据南宁市产业优化调整情况,工业用水以及污染物排放量显著减少,第三产业以及生活用水占比增加,两者对南宁市水环境以及水资源的影响必然不断提高。

(2) 水生态足迹是分析水资源与城市扩张关系的重要参数,为研究城市经济发展与扩张和水资源利用关系提供了更加全面的视角。根据对水生态足迹分析,从水环境被破坏的视角出发,了解城市扩张是否导致了岩溶地区城市水环境被严重破坏。一旦出现水生态被破坏严重等问题,由于被污染、破坏的水资源不再具备开发利用价值,因此虽然从总量角度来看水资源并未显著减少,但水资源不足的问题依然严峻。

(3) 水资源与城市扩展需要实现脱钩,两者的脱钩关系可以根据水资源与经济脱钩关系分析确定。水资源与经济脱钩关系,无论按照绝对脱钩、相对脱钩、未脱钩进行划分,或按照强脱钩、弱脱钩以及拓展性(负)脱钩进行划分,均仅能根据分类判断脱钩情况,缺乏必

要的指导性。本研究则在既往水环境脱钩相关研究基础上引入了脱钩类别的概念,建立了水资源脱钩与城市扩张的关系。通过将脱钩的类别纳入分类体系,本研究得到的结论具备更积极的指导性,根据本研究提出的脱钩分类结果,相关部门在政策制定等方面能够显著提升其针对性。

从本研究的结果来看,南宁市城市扩张对水资源的影响主要集中在城市水资源的使用总量不断增加方面。根据本研究的结果可以充分了解城市扩张对南宁市水生态环境的影响,但本研究采用的数据相对有限,数据来源的分类并不清晰,因此目前得到的结论依然缺乏细节。

参考文献(References):

- [1] 刘澄静. 基于氢氧稳定同位素的哈尼梯田景观多尺度水循环过程研究[D]. 云南师范大学, 2023, 11-14.
- [2] 于苗. 典型北方岩溶大泉优势流渗流机制研究[D]. 济南大学, 2023, 20-22.
- [3] 李天雨. 管道—裂隙型岩溶地下水流场特征及径流通道参数辨识研究[D]. 山东大学, 2022, 9-14.
- [4] 许国钰, 任晓冬. STRIPAT 模型下城镇化与水资源载荷的相关性研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(1): 40-45.
- [5] 李慧华, 袁健红, 冯吉芳. 中国区域人类福利与自然消耗脱钩关系及其影响因素研究[J]. 中国科技论坛, 2018(3): 135-142.
- [6] 王喜峰, 李富强. 经济发展方式转变对水资源承载能力影响研究——基于北京市相关数据的实证分析[J]. 价格理论与实践, 2017(8): 15-19.
- [7] 陈芷君, 刘毅华, 林华荣. 广东省土地利用碳排放与经济增长之间的脱钩分析[J]. 生态经济, 2018, 34(5): 26-32.
- [8] 张结. 济南泉域岩溶水硝酸盐和硫酸盐来源识别及升高机理研究[D]. 中国地质大学, 2022, 17-25.
- [9] 赵良杰. 岩溶裂隙-管道双重含水介质水流交换机理研究[D]. 中国地质大学(北京), 2019, 34-42.
- [10] 李慧. 城市化影响下西安市地下水流场演变及其机制[D]. 长安大学, 2018, 27-36.

作者简介:

第一作者:黄之巍,1983年生,男,广西马山人,硕士,广西
壮族自治区地质调查院,高级工程师,主要研究方向
为水利工程。Email:27381308@qq.com

通讯作者:黄春阳,1983年生,男,湖南衡阳人,硕士,广
西壮族自治区地质调查院,高级工程师,主要研究方向
为水利工程。Email:79601738@qq.com

Study on the Decoupling Relationship between Urban Expansion and Water Resources and Water Environment: A Case Study of Protective Development of the Karst Aquifer in Nanning City

HUANG Zhiwei, HUANG Chunyang*, WU Pengqing, LIANG Shuang, XIE Weian
(Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Survey Institute, Nanning 530023, China)

Abstract: China is still in an important stage of urban construction and expansion. Balancing the relationship between urban development and environmental protection has a significant impact on the stable development of cities. How to avoid strong disturbance and damage from urban development to the karst aquifer surrounding the city and keep the structure of the aquifer stable, while meeting the needs of urban development and maintaining continuous and stable urban development, is a problem that must be addressed in current urban development. This study compares the disturbances to the karst aquifer caused by the increase in water use and the increase in water pollution resulting from urban expansion, and, from the perspective of decoupling increased demand from disturbances to the karst aquifer, proposes decoupling measures to avoid excessive disturbances. Finally, this paper takes Nanning City as a case study and makes a specific analysis of cases and data on how to achieve a reduction in disturbances.

Key words: urban expansion; karst aquifer; ecological footprint; decoupling