

杨振华, 苏维词, 赵卫权, 等. 基于 GRNN 模型的岩溶地区城市水生态足迹分析与预测[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 36–42.
DOI:10.11932/karst20160106

基于 GRNN 模型的岩溶地区城市 水生态足迹分析与预测

杨振华¹, 苏维词^{2,3}, 赵卫权², 谢砷军³, 李艳丽³

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001;

3. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 400047)

摘 要:为揭示岩溶地区城市生态足迹的驱动因子与机制, 评估和预测水资源可持续利用程度, 根据岩溶地区水文地质特征及其与水生态足迹的相关性, 分析了贵阳市 2002–2014 年水生态足迹的变化特征, 并利用 GRNN 模型对其进行了时间序列预测。结果表明, 贵阳市水生态足迹由 2002 年的 12.79 万 hm^2 上升至 2014 年的 15.74 万 hm^2 , 整体呈波动上升趋势, 其中, 水量生态足迹变化特征主要由工业用水量决定, 水质生态足迹变化特征主要由氨氮排放量决定。水生态承载力波动变化明显, 且小于水生态足迹需水量, 导致水资源可持续利用系数介于 0.31~0.63 之间。对贵阳市 2015–2019 年水生态足迹进行 GRNN 预测, 表明水生态足迹呈现先升后降得趋势, 水生态承载力变幅在 4.315~8.038 万 hm^2 之间, 但水生态足迹与承载力的缺口大, 水资源可持续利用系数偏低。因此, 在水生态承载力有限的贵阳市, 降低水生态足迹才是实现水资源可持续利用的关键。

关键词:GRNN 模型; 岩溶; 水生态足迹; 预测

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1001–4810(2016)01–0036–07

0 引 言

生态足迹理论自 20 世纪 90 年代由加拿大生态经济学家 William Rees 首次提出了以来, Mathis Wackernagel 等对其计算原理及方法进行了进一步拓展和完善^[1–3], 由此衍生出水足迹、水生态足迹等概念^[4–6], 并逐渐成为水资源供求领域的研究热点。例如, 将水生态足迹抽象为由用水量和水产品消耗量折算而来的虚拟水^[7]; 核算了全国^[8]、江苏省^[9]、宁波市^[10]等不同区域尺度的多年水资源生态足迹; 建立了涵盖生活用水、生产用水、公共服务用水和生态需水 4 类账户的城市水生态足迹, 而且将淡水生态系统的生物生产力、水资源供应和水环境净化功能纳入生态足迹框架, 从而扩展了传统水资源生态足迹的核算

范围, 丰富了水生态足迹的内涵^[11–12]。除了对水生态足迹的历年现状进行分析外, 学者们也对其未来发展趋势进行预测, 如运用 ARIMA 模型对城市水生态足迹进行预测, 并取得良好的预测精度, 对水生态足迹时间变化规律有了更清晰的认识^[13]。以往水生态足迹研究主要集中于其核算内容拓展和历年变化特征研究, 且预测方法单一, 无法就不同方法的优缺点来选取更佳的预测模型, 同时缺乏对岩溶地质地貌区城市水生态足迹分析与预测研究。

西南岩溶山区在“二元三维”结构的影响下, 降雨漏失严重, 地表径流系数低, 以雨源型径流为主, 地下水资源丰富, 但赋存规律复杂, 且利用难度大, 直接限制地表工农业、生活用水的供给量, 降低岩溶地区城市水生态承载能力。同时, 由于地表与地下岩溶地貌

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ25B09)

第一作者简介: 杨振华(1991–), 男, 硕士研究生, 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(1966–), 男, 研究员, 主要从事城市生态环境可持续发展研究。E-mail: suweici@sina.com。

收稿日期: 2015–08–17

发育,土层浅薄,裂隙密布,岩土层渗透系数高,使城市地表水与地下水形成联动污染,降低地表与地下水资源的纳污能力,加大表层岩溶水污染生态足迹与生态承载力的差距。另外,溶蚀—侵蚀—构造等多重地质作用下发育的岩溶地貌,使地表起伏度大,岩溶裂隙密布,岩体破碎,平缓沉积形态缺乏,使城市建成区异常集中,耕地零碎,坡度大,城市人口密集,农村人口居住分散,导致工业用水比重大,灌溉用水比重低,生活用水集中于城市地区,使水量生态足迹受岩溶地貌影响大。因此,为合理预测岩溶地区城市水生态足迹与生态承载力的发展趋势,探讨岩溶水文特征与水生态足迹的关系,对 2002—2014 年贵阳市水生态足迹和生态承载力进行分析,在比较和分析 GRNN 模型与 BP 模型对历时短、变异性大的小样本容量预测精度的基础上,采用 GRNN 预测模型对 2015—2019 年贵阳市水生态足迹进行时间序列预测,同时,探究岩溶地区城市生态足迹的驱动因子与机制,为水利相关部门提供水资源可持续利用的决策依据。

1 研究与方法

1.1 基本理论

1.1.1 水生态足迹核算

水域生物生产能力是由区域水量和水质决定的,故水生态足迹核算中不加入渔业账户。另外,水生态承载力中并不包含水资源对生态环境本身的支持量,因此,水量生态足迹也不加入生态需水量。然后,将水生态足迹核算账户折算成区域水资源供给和污水消纳的水资源用地需求,并核算城市水生态承载力,通过供需两方面的比较分析,判断出区域水资源可持续利用状况与发展潜力。

水生态足迹核算模型^[14]为:

$$EF_w = EF_{wr} + EF_{wq} \quad (1)$$

式中, EF_w 为水生态足迹(hm^2); EF_{wr} 为水资源生态足迹(hm^2); EF_{wq} 为水污染生态足迹(hm^2)。其中,水量生态足迹为:

$$EF_{wr} = N \times ef_{wr} = r_w \times U_{wr} / P_w \quad (2)$$

式中, N 为区域总人口数; ef_{wr} 为人均水量生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); r_w 为全球水资源均衡因子; U_{wr} 为区域水资源利用量,且 $U_{wr} = U_{wr1} + U_{wr2} + U_{wr3}$, U_{wr1} 、 U_{wr2} 、 U_{wr3} 分别代表工业用水、农业用水、城乡居民生活用水等(m^3); P_w 为全球水资源平均生产能力(m^3/hm^2)。

为有效的判别水体中主要污染物排放程度,引入 COD 和氨氮排放量的核算子账户,分析废水中主要

污染物浓度对水质生态足迹的影响。

水质生态足迹核算模型^[15]为:

$$\begin{aligned} EF_{wq} &= EF_{\text{COD}} + EF_{\text{NH}_3} \\ &= r_w \times \left(\frac{U_{\text{COD}}}{P_{\text{COD}}} + \frac{U_{\text{NH}_3}}{P_{\text{NH}_3}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, EF_{COD} 和 EF_{NH_3} 分别代表 COD 水生态足迹和 NH_3 水生态足迹; U_{COD} 和 U_{NH_3} 分别代表区域内社会生产、生活过程中 COD 和氨氮的排放量; P_{COD} 和 P_{NH_3} 代表单位面积水域对污染物 COD 和 NH_3 的吸纳能力(t/hm^2)。

1.1.2 水生态承载力核算

水生态承载力计算模型为:

$$EC_w = (1 - 0.6) \times r_w \times \varphi \times Q / P \quad (4)$$

式中, EC_w 为城市水生态承载力(hm^2); φ 为区域水资源产量因子; r_w 为全球水资源均衡因子; Q 为区域水资源总量(m^3); $(1 - 0.6)$ 为扣除 60% 用于维持生态环境本身发展和生物多样性的水资源量。

1.1.3 水资源可持续利用指数

将水生态足迹和水生态承载力的比值作为区域水资源可持续利用指数,表征区域水资源供需平衡状况以及区域社会经济发展与水资源的协调性。

$$WSUI = EC_w / EF_w \quad (5)$$

式中, $WSUI$ 代表区域水资源可持续利用指数,当 $WSUI \in [0, 1]$ 时,表明区域水资源供给量小于消耗量,且其值越小,代表水资源供需缺口越大,水资源可持续利用程度也越低;当 $\in [1, +\infty]$ 时,表明区域水资源供给量大于消耗量,且其值越大,水资源可持续利用程度也越高;当 $WSUI = 1$ 时,区域水资源供给需求达到临界平衡,是水资源生态可持续利用程度的临界点。

水资源生态足迹和水资源承载力核算参数主要为水资源的全球均衡因子 r_w 、区域水资源的产量因子 φ 、水资源平均生产能力 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; φ 为该区域多年水资源平均生产能力与世界水资源平均生产能力的比值,经核算贵阳市产量因子为 1.67。水资源全球平均生产能力参照文献^[9]进行核算,取 $3\,140\,\text{m}^3/\text{hm}^2$;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、1.0 mg/L,计算出全球水域 COD、氨氮的平均消纳能力分别为 $0.062\,9$ 、 $0.003\,1\,\text{t}/\text{hm}^2$ ^[10]。

1.1.4 GRNN 预测模型

广义回归神经网络 (Generalized Regression

Neural Network, GRNN)作为一种高度并行的 RBF 神经网络,具有很强的非线性映射能力和柔性网络结构,同时具有高度的容错性和鲁棒性^[16],与 AHP 层次分析、模糊评价等多因素综合指数评价模型相比,无需人为确定模型参数或权重,从而提高了模型评价的客观科学性。广义回归神经网络的理论基础为非线性回归分析,非独立变量 Y 相对于独立变量 x 的回归分析实际上是计算具有的最大概率值的 y ,且其条件均值为

$$\hat{Y} = E(y/X) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} yf(X,y)dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f(X,y)dy} \tag{6}$$

式中: $\hat{Y}$ 为在输入为 X 的条件下对应 Y 的预测输出。

在应用 Parzen 非参数估计条件下,可由样本数据集 $\{x_i, y_i\}_{i=1}^n$ 估算密度函数 $\hat{f}(X, y)$ 。

$$\hat{f}(X, y) = \frac{1}{n(2\pi)^{\frac{p+1}{2}} \sigma^{p+1}} \sum_{i=1}^n e\left[-\frac{\langle X-X_i \rangle^T \langle X-X_i \rangle}{2\sigma^2}\right] e\left[-\frac{\langle X-Y_i \rangle^2}{2\sigma^2}\right] \tag{7}$$

式中: X_i 、 Y_i 分别为随机变量 x 和 y 的样本观测值; n 为样本容量; p 为随机变量 x 的维数; σ 为高斯函数的宽度系数,即光滑因子。

用 $\hat{f}(X, y)$ 代替 $f(X, y)$ 带入式(6),并交换积分与求和的顺序:

$$\begin{aligned} \hat{Y}(X) = E(y/X) &= \frac{\sum_{i=1}^n e\left[-\frac{\langle X-X_i \rangle^T \langle X-X_i \rangle}{2\sigma^2}\right] \int_{-\infty}^{\infty} y e\left(-\frac{\langle X-Y_i \rangle^2}{2\sigma^2}\right) dy}{\sum_{i=1}^n e\left[-\frac{\langle X-X_i \rangle^T \langle X-X_i \rangle}{2\sigma^2}\right] \int_{-\infty}^{\infty} e\left(-\frac{\langle X-Y_i \rangle^2}{2\sigma^2}\right) dy} \end{aligned} \tag{8}$$

由于 $\int_{-\infty}^{\infty} z e^{-z^2} dy = 0$,对于两个积分进行计算后可得到网络输出 $\hat{Y}(X)$,为

$$\hat{Y}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i e\left[-\frac{\langle X-X_i \rangle^T \langle X-X_i \rangle}{2\sigma^2}\right]}{\sum_{i=1}^n e\left[-\frac{\langle X-X_i \rangle^T \langle X-X_i \rangle}{2\sigma^2}\right]} \tag{9}$$

$\hat{Y}(X)$ 为所有样本观测值 Y_i 的加权平均,每个样本值 Y_i 的权重因子为相应的样本 X_i 与 X 之间的 Euclid 距离平方的指数。当光滑因子 σ 趋向于 $+\infty$ 时,则概率密度函数的估计较平滑, $\hat{Y}(X)$ 为多元 Gauss 函数,接近于所有样本应变量的均值;当平滑参数 σ

趋向于 0 时,估计值 $Y(x)$ 为所有估计值 $\hat{Y}(X)$ 为与输入变量 X 之间 Euclid 距离最近的样本观测值;对于合适的平滑参数,所有样本观测值均可计算在内,且与 X 之间 Euclid 距离较近的样本观测值的权重因子较大^[17]。

1.2 研究区概况

贵阳市位于贵州省中部,地处东经 $106^{\circ}07' \sim 107^{\circ}17'$,北纬 $26^{\circ}11' \sim 27^{\circ}22'$,国土总面积 $8\,034\text{ km}^2$ 。属亚热带高原季风湿润气候,降水量充沛,雨热同期,但降水时空分布不均,且境内以山地、丘陵地貌为主,岩溶地貌广布,属于典型岩溶盆地型城市,受岩溶“二元三维”地貌的影响,降水流失、蒸发快,水资源开发利用率低。贵阳市河流水系分属长江流域的乌江水系和珠江流域的红柳江水系,分水岭以北属长江流域,面积 $7\,565\text{ km}^2$,占全市总面积的 94.2% ;以南属珠江流域,面积 468.9 km^2 ,占全市总面积的 5.8% 。

1.3 数据来源

数据来源于 2002—2014 年的《贵州省统计年鉴》、《贵阳市统计年鉴》、《贵阳市环境状况公报》、《贵阳市水资源公报》、《成都市水资源公报》等相关资料。

2 结果与分析

2.1 历年水量、水质生态足迹

依据水生态足迹计算公式,得到贵阳市 2002—2014 年水量(工业、农业、生活)和水质(COD、氨氮)生态足迹的变化特征,如图 1 和图 2 所示。

从图 1 可以看出,贵阳市水量生态足迹整体上呈先升后降再缓慢上升的趋势,历年波动的阶段性特征

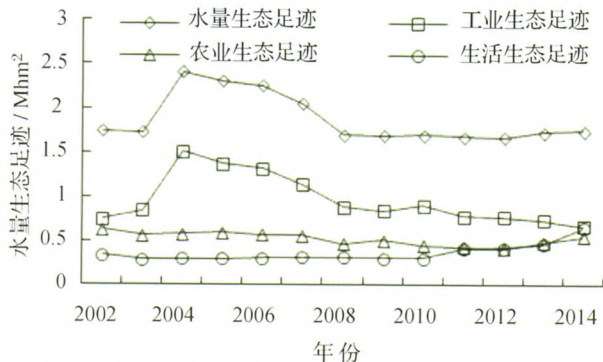


图 1 2002—2014 年贵阳市水量生态足迹的变化
Fig. 1 Water volume ecological footprint change map of Guiyang from 2002 to 2014

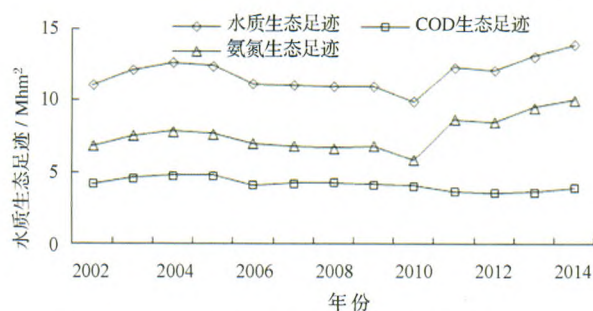


图 2 2002—2014 年贵阳市水质生态足迹的变化

Fig. 2 Water quality ecological footprint change map of Guiyang from 2002 to 2014

明显,波动范围在 1.699~2.410 Mhm²之间,特别是 2003—2008 年之间,水量生态足迹先大幅上升后逐渐下降,变化幅度达 0.711 Mhm²,2009—2014 年则缓慢上升,升幅仅有 0.059 Mhm²。从历年工业、农业和生活用水量的生态足迹来看,自 2008 年以来,工业生态足迹呈缓慢下降趋势,从 0.889 Mhm²降至 2014 年 0.674 Mhm²,但其比重最大,成为影响水量生态足迹的变化趋势的重要部分。随着耕地面积的萎缩,农业用水效率的提升,使农业生态足迹整体呈下降趋势,同时,在人口激增(年均增长率达 2.5%),城市化水平不断加快的背景下,城乡居民用水总量增加,也导致生活生态足迹不断提升,其显著增加段集中在 2009—2014 年之间,增幅达 0.35 Mhm²,年平均增长率为 17.51%。

研究选取主要水体污染物指标 COD 和氨氮作为水质生态足迹核算账户。根据图 2 可以发现,2002—2014 年贵阳市水质生态足迹呈波段式缓慢上升趋势,其中 2002—2004 年呈持续上升趋势,增幅为 1.59 Mhm²;2005—2010 年则持续下降,降幅为 2.69 Mhm²;2010—2014 年则快速上升,升幅为 4.19 Mhm²,年均增长率达 9.28%;其主因为 2002—2004 年间工业产值不断上升,氨氮排放量也持续增加,2005—2010 年氨氮排放量持续下降,而 2011—2014 年在贵州省“工业强省”战略的推动下,氨氮排放量却强烈反弹,其变化趋势与水质生态足迹一致,因此,水质生态足迹波动特征主要由氨氮生态足迹的变化量决定。而 COD 生态足迹则呈相对平稳,变化幅度不明显,其值由 2002 年的 4.19 Mhm²下降至 2014 年的 3.94 Mhm²,年均下降幅度 0.25 Mhm²。

2.2 历年水生态承载力

从图 3 可以看出,水生态承载力与水资源可持续利用系数有较强的相关性,且呈波动式发展,其波动范围介于 4.315~8.038 Mhm²之间。除 2011—2014

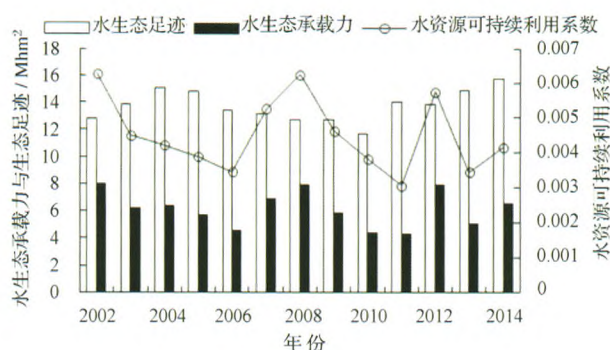


图 3 2002—2014 年贵阳市水资源可持续利用指数的变化

Fig. 3 Changes of water resources sustainable utilization index of Guiyang from 2002 to 2014

年水生态承载力交替升降外,2002—2006 年、2008—2011 年水生态承载力持续下降,相反,2006—2008 年、则呈上升态势。主要原因为贵阳市丰水年、枯水年的交替转换,水资源总量波动变化大,其波动幅度达 32.983 亿 m³。其中,2006 年的旱灾以及 2010 年前后的西南大旱时期降水量减少是水生态承载力明显下降的关键因素。

2.3 历年水资源可持续利用指数变化

从图 3 可以发现,水生态足迹呈波动变化的特征,且升降幅度较大,其波动范围为 11.650~15.738 Mhm²,而水生态承载力亦变幅明显,其变化幅度达 3.722 Mhm²,由于水生态足迹与水生态承载力的波动式发展,导致水资源可持续利用指数的变化特征明显,且水资源可持续利用指数主要由值较小的水生态承载力决定。另外,贵阳市 2002—2014 年水资源可持续利用指数皆小于 1.0,其变化范围介于 0.300~0.615 之间,表明贵阳市水资源利用系统常年处于超负荷状态,在超量的水生态足迹影响下,水生态系统将趋于恶化,水资源可持续利用面临较大压力。

2.4 水生态足迹时间序列分析与预测

水生态足迹与水生态承载力的影响因素较多,核算账户少,且年度数据量有限,故采用相关性分析法,确定以降水量、产水模数、大中型水库蓄水量、出入境水量差、耗水量、GDP、工业比重、有效灌溉面积、人口等项 9 指标作为网络输入,以水资源可持续利用系数、水量生态足迹、水质生态足迹等 3 项指标为网络输出,以 2002—2013 年的 12 组数据为训练样本,2014 年的数据为外推测试样本的基于交叉验证训练的 GRNN 预测模型,并循环找出最优平滑因子 (SPREADE),以求达到最小预测误差。

如表 1 所示,利用交叉检验可以找出不同平滑因子下的 GRNN 与 BP 模型预测误差,发现 2 种模型的预测均方差都有随着平滑因子增大而增大的趋势,同时,在同一平滑因子条件下,GRNN 模型相比于 BP 模型具有整体预测误差小,变化特征平稳的特点,故选取 GRNN 模型来进行生态足迹预测。如平滑因子为 0.01 时(以 2013 年为例)GRNN 模型预测的水

生态足迹相对误差比 BP 模型大 0.03,但其对水资源承载力、水资源可持续利用系数的预测误差比 BP 模型分别小 0.01 和 0.279,且 GRNN 模型的平均误差为 0.042,而 BP 模型则达 0.135。上述证明利用 GRNN 模型预测贵阳市 2015—2019 年的水生态足迹、水生态承载力和水资源可持续利用系数可获得更好的预测精度。

表 1 不同平滑因子下的 GRNN 与 BP 预测模型 MSE 特征

Table 1 The MSE characteristics of the GRNN and BP prediction model under different smoothing factors

平滑因子	GRNN			BP		
	水生态足迹 /hm ²	水生态承载力 /hm ²	可持续利用 系数	水生态足迹 /hm ²	水生态承载力 /hm ²	可持续利用 系数
0.010	386 280	496 962	0.001	340 701	555 132	0.094
0.125	540 221	806 997	0.037	545 010	420 267	0.085
0.250	852 321	806 997	0.037	1 907 341	449 227	0.041
0.375	852 321	806 996	0.037	663 816	1 162 182	0.175
0.500	852 322	806 973	0.037	527 092	1 759 386	0.063
0.625	877 975	447 981	0.010	1 582 258	1 390 745	0.109
0.750	918 782	576 554	0.008	2 448 649	201 977	0.065
0.875	1 339 985	395 753	0.064	2 189 382	3 307 204	0.060
1.000	1 384 944	246 663	0.055	215 713	1 262 464	0.155
1.125	1 298 248	255 471	0.053	2 138 238	129 922	0.100
1.250	905 212	262 772	0.065	532 749	1 225 074	0.013
1.375	1 251 115	403 509	0.056	2 533 764	1 655 377	0.244
1.410	2 138 238	299 210	0.100	911 209	1 052 406	0.213
1.500	1 196 839	341 335	0.068	209 859	135 570	0.087

根据 GRNN 预测模型的循环优化原理,采用逐年预测的原则,选取相近平滑因子,对贵阳市 2015—2019 年水生态足迹、生态承载力和可持续利用系数进行预测(表 2)。从预测结果来看,贵阳市 2015—2019 年水生态足迹呈波动下降趋势,年均水生态足迹年均降幅 77 392.31 hm²,主要因为人口增长,城市生活污水排放量不断提升,水质氨氮生态足迹上升可能性较大。水生态承载力维持在相对稳定的水平,其总变化幅度不超过 96 490 hm²。贵阳市水资源产量因子相对均衡,但易于开发的地表、地下水有限,其水资源总量受降水年际变化影响显著,使水生态足迹与生态承载力的缺口呈波动式增大,且年均缺口值达 63 076 hm²,年均增速为 1.05%,这也导致水资源可持续利用系数呈逐渐下降趋势,按此趋势,贵阳市未来 4 a 内水资源可持续利用仍面临较大压力。

2.5 水生态足迹驱动因子分析

为了更好地揭示贵阳市水资源生态足迹的

表 2 基于 GRNN 模型的贵阳市 2015—2019 年水生态足迹预测

Table 2 The water ecological footprint prediction model based on GRNN of Guiyang from 2015 to 2019

年份	平滑因子	水生态足迹 /hm ²	水生态承载力 /hm ²	水资源利用 系数
2015	0.940	14 806 980	5 802 170	0.403
2016	0.560	15 044 959	5 712 277	0.373
2017	0.570	14 925 970	5 757 224	0.388
2018	0.730	14 985 464	5 734 750	0.380
2019	0.710	14 420 018	5 603 488	0.347

驱动因子,通过横向对比具有相似人口、经济、气候背景的非岩溶地区成都市水生态足迹,分析出贵阳市水生态足迹的岩溶性特征和驱动因子,故从以下几个方面分析岩溶地区城市水生态足迹与生态承载力的特殊性。

2.5.1 岩溶地质地貌特征

贵阳市地处于云贵高原东部的岩溶盆地地区,区

内地形起伏大,地貌复杂多样,多发育岩溶丘陵、洼地和槽谷等地貌^[18]。以 2013 年贵阳与成都用水结构比较为例,贵阳工业用水量占总用水量比重达 43.21%,而成都工业用水比重仅占 21.47%,其因为岩溶山区地表起伏大,交通不便,不具备规模化工业生产条件,单位面积工业产值低,导致工业水生态足迹比重大。贵阳农业集中产区位于在花溪区、修文县、开阳县、清镇市等工业相对落后,水土资源丰富腴的洼地地区,其农业用水量比重为 28.20%,比成都市农业用水比重低 26.68%,其因为耕地多零碎分布于峰丛、峰林洼地和槽谷地区,面积比重小,灌溉水保障能力差,灌溉水量低,贵阳灌溉水量仅 3 060 m³/hm²,而成都灌溉水量高达 8 325 m³/hm²,超出贵阳灌溉水量的 1.59 倍。居民生活用水量比重为 18.68%,其中城镇居民用水量为 15.2%,农村居民用水量比重仅达 3.48%。贵阳生活供水优先保障,故人均年生活用水量为 62.08 m²较成都略高 0.97 m²,相差不大,故随着城市人口的增加,生活用水生态足迹也逐渐上升。

2.5.2 岩溶水文特征

贵阳市气候温和,雨量充沛,多年平均降水量达 1 174 mm,降水多集中在 5—10 月,但由于岩溶地貌的断层和裂隙发育,地裂塌陷及落水洞分布广泛,导致地表产水能力弱,径流系数低。以 2012 年为例,位于岩溶区的贵阳市和位于非岩溶区的成都市年降水分别为 1 149.5、1 106.5 mm,二者降雨补给量相当,其年平均产水模数分别为 62 500、656 174 m³/km²,年径流系数分别为 0.55、0.61,可以发现,贵阳降雨量虽大于成都,但成都的产水模数和径流系数都大于贵阳,表明贵阳市地表水可利用水资源相对有限,同时,贵阳库、塘、堰、渠等水利工程密度低,蓄水能力差,使贵阳人均水资源量低,限制贵阳市大规模工业用水生态足迹的增长。另外,在地表与地下岩溶地貌作用下,地表水与地下水水力联系紧密,形成地表与地下水联动污染,降低水资源的纳污能力,降低贵阳市水资源可持续利用系数。

2.5.3 城市化人口与经济活动

在人口和工业的集聚效益影响下,城市化过程使贵阳市城市生活水生态足迹剧增,城镇居民生活用水由 2002 年的 1.45 亿 m³ 上升至 2014 年的 1.86 亿 m³,年均增长 0.031 亿 m³;城市化过程中,工业用水量增加的同时,工业污染物(COD 等)排放量却逐渐减少,另外,农业用水量则由地表散碎的农田灌溉系统和降水季节性特征决定的,受丰枯水年份的影响大。因此,决定贵阳市水生态足迹波动变化的主要人

为驱动因子是人口增长和工业发展。

3 结论与建议

岩溶地区由于地表产蓄水能力弱,导致水生态承载力小,直接限制了贵阳市工农业水足迹的增长,使农业水足迹比重低;工业水足迹主导的岩溶城市水足迹结构,使地表、地下水体污染物排放量大,水环境污染相对严重,水资源系统处于不可持续利用状态。其主要是因为:一方面,贵阳市年际水资源量供给量小且变异性大,最大值为 71.22 亿 m³,最小值仅 38.24 亿 m³,标准差达 12.037,导致人均水生态承载力较低,呈波动下降趋势;另一方面,贵阳市工业用水量和污染物排放量大,虽然人均水生态足迹呈波动下降的趋势,但总体水生态足迹却在 2010—2014 年间快速上升,特别是水生态足迹中的氨氮排放量在人口压力增加的背景下从 0.35 万 t 上升至 0.56 万 t,年增加排放量 0.053 万 t,用水量也从 10.21 亿 m³ 上升至 10.46 亿 m³,使 2002—2014 年的水生态足迹远大于水生态承载力,水资源可持续利用面临较大压力。按照目前可利用水资源的供给能力预测,2015—2019 年贵阳市水资源可持续利用平均系数为 0.423,距离水资源利用平衡点 0.577。

基于分析与预测结果,从水足迹的角度,贵阳市水资源可持续利用的对策与建议主要有:

(1) 优化水资源生态利用模式。贵阳市水资源可持续利用面临的压力逐渐增加,从水资源利用结构特点可知其主要需求压力来源于工农业发展。数据分析表明,贵阳市历年平均工农业用水量占总用水量比重为 78.56%,且成逐渐下降的趋势,其用水比重从 2002 年的 79.94% 降至 2014 年 68.91%,但城乡居民生活用水量比重仅由 2002 年的 20.06% 下降至 2014 年的 17.56%。因此,贵阳市在优化产业结构的同时,还需控制人口的增长,严格控制高耗水行业的发展,推进冶炼、化工、食品、医药等重点耗水行业的节水技术改造,提高工农业用水效率,降低城市水量生态足迹。

(2) 提高水资源生态利用效益。贵阳市地处岩溶盆地地区,地表产蓄流能力有限,地下渗漏作用强烈,为保护脆弱生态环境的持续性发展,应当提高水生态利用效益,主要表现为降低水体 COD 和氨氮污染物的排放量,严禁重度危害污染物排放,重点治理工业和城镇生活污水,净化水源地水质,降低水质生态足迹,实现水资源供给利用系统的可持续发展。

参考文献

- [1] William E R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out? [J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2):121-130.
- [2] Wackernagel M, William E R. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth. Gabriela Is land, B. C. [N]. New Society Publishers, 1996, 2-17.
- [3] Wackernagel M, Onisto I, Bello P. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29:375-390.
- [4] 邓晓军,谢世友. 水足迹分析理论与方法[J]. *资源开发与市场*, 2007, 23(3):210-212.
- [5] 段锦,康慕谊,江源. 基于淡水资源账户和污染账户的生态足迹改进模型[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(6):953-963.
- [6] 刘子刚,郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究:以浙江省湖州市为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(6):1083-1088.
- [7] 徐中民,程国栋,张志强. 生态足迹方法:可持续性定量研究的新方法:以张掖地区 1995 年生态足迹计算为例[J]. *生态学报*, 2001, 21(9):1484-1493.
- [8] 谭秀娟,郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. *生态学报*, 2009, 29(7):3559-3568.
- [9] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[J]. *生态学报*, 2008, 28(3):1279-1286.
- [10] 董朝阳,伍磊,童亿勤. 生态足迹视角下的宁波市水资源可持续利用评价[J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(3):349-361.
- [11] 王俭,张朝星,于英谭,等. 城市水资源生态足迹核算模型及应用:以沈阳市为例[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8):2257-2262.
- [12] 张义,张合平,李丰生,等. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. *资源科学*, 2013, 35(8):1601-1610.
- [13] 于冰,徐琳瑜. 城市水生态系统可持续发展评价:以大连市为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(12):2578-2583.
- [14] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade [J]. *Value of water research report series*, 2002, (11):239-304.
- [15] 闵庆文,焦雯璐,成升魁. 污染足迹:一种基于生态系统服务的生态足迹[J]. *资源科学*, 2011, 33(2):195-200.
- [16] 张义,张全平. 基于生态服务的广西水生态足迹分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(13):4111-4124.
- [17] 崔东文. RBF 与 GRNN 神经网络模型在河流健康评价中的应用:以文山州区域中小河流健康评价为例[J]. *中国农村水利水电*, 2012(3):56-62.
- [18] 伊良忠,章超,裴峥. 广义回归神经网络的改进及在交通预测中的应用[J]. *山东大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(1):9-14.
- [19] 高红艳,刁承泰. 试论喀斯特地貌对城市建设的影响:以喀斯特山区城市贵阳市为例[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(1):81-86.

Analysis and forecast of water ecological footprint in karst area based on GRNN model

YANG Zhen-hua¹, SU Wei-ci^{2,3}, ZHAO Wei-quan², XIE Zhu-jun³, LI Yan-li³

(1. *Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;*

2. *Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China;*

3. *College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing, 400047, China)*

Abstract In order to reveal the driving factors and mechanism of urban ecological footprint, evaluating and predicting the degree of sustainable utilization of water resources in karst area, the change characteristics of water ecological footprint in Guiyang City from 2002 to 2014 were analyzed, according to the hydrogeological features in karst area and its correlation with the water ecological footprint, and the GRNN model was used to predict and evaluate the water ecological footprint time series. The results showed that the water ecological footprint of Guiyang city rose from 12.79 Mhm² in 2002 to 15.74 Mhm² in 2014, of which the variety of water volume ecological footprint was determined by the industrial water consumption, water quality ecological footprint change was determined by the ammonia emissions. The fluctuation of the water ecological carrying capacity was obvious, and the water demand was less than the water ecological footprint, which led to the coefficient of sustainable utilization of water resources was between 0.34 and 0.61. The water ecological footprint from 2015 to 2019 in Guiyang city is predicted by the GRNN model, which show that the trend of water ecological footprint first increase and then decrease, and the water ecological carrying capacity ranged from 4.315 Mhm² to 8.038 Mhm². But the gap between the water ecological footprint and the carrying capacity is huge; the water resources sustainable utilization coefficient is low. Therefore, the reduction of the water ecological footprint is the key to sustainable development of the water resources in Guiyang city, of which the water ecological carrying capacity is limited in karst area.

Key words GRNN, karst, water ecological footprint, forecast

(编辑 张玲)