



欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

水城盆地空间城镇化对浅层岩溶地下水特征的影响

巨凡凡,马腾,顾栩

引用本文: 巨凡凡,马腾,顾栩.水城盆地空间城镇化对浅层岩溶地下水特征的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(1):123-134.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0375

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

玛纳斯河流域土壤盐渍化影响因素研究

郑琦,王海江,李万涛,余露,邵奇 农业资源与环境学报.2016,33(3):214-220 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0263

基于SWAP模型的耕地-盐荒地-沙丘-海子水盐动态分析

曾揭峰,刘霞,李就好,夏玉红,王丽萍 农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 540-549 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0226

节水改造对沈乌灌域不同地貌浅层地下水埋深的影响

韩天凯,丁雪华,潘春洋,刘月 农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 620-629 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0352

玛纳斯河流域耕地利用潜力评价

张丽,盛建东,蒋平安 农业资源与环境学报. 2015(4): 338-342 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0071

西部绿洲城市土地利用转型的生态环境效应——以乌鲁木齐市为例

阿依吐尔逊・沙木西, 刘新平, 祖丽菲娅・买买提, 陈前利, 冯彤 农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 149-159 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0113



关注微信公众号,获得更多资讯信息

巨凡凡,马 腾,顾 栩.水城盆地空间城镇化对浅层岩溶地下水特征的影响[J].农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 123-134. JU Fan-fan, MA Teng, GU Xu. The effect of spatial urbanization on the characteristics of shallow karst groundwater in Shuicheng basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1): 123-134.

水城盆地空间城镇化对浅层岩溶地下水特征的影响

巨凡凡,马 腾*,顾 栩

(中国地质大学环境学院,武汉 430074)

摘 要:为研究水城盆地空间城镇化对浅层岩溶地下水的影响,以六盘水市水城盆地为研究对象,通过分析地下水采样点的氢氧 同位素和水化学组分、地下水长期监测点的水位资料,研究了地下水补给来源和空间城镇化对岩溶地下水水化学特征、水位动态 产生的影响。结果表明:研究区内地下水主要来自大气降水补给,水化学类型主要为HCO₃-Ca和HCO₃·SO₄-Ca型;空间城镇化影 响下土地利用类型的空间差异与浅层岩溶地下水诸多离子的富集具有空间一致性,Cl⁻和NH₃-N主要富集在建筑用地区,NO₃和 SO⁴主要富集在耕地、林地和裸地等非建筑用地区,而Mn和As则主要来自工业建设产生的点源污染。研究区年内和年际地下水水 位变幅均趋于稳定,结合该时期的降雨量与地下水水位变幅面积的关系,证明空间城镇化发展导致不透水面的增加,降低了地下水 水位对降雨的响应程度,地下水补给条件变差,地下水开采量的变化成为影响地下水水位的主要因素。研究表明:空间城镇化建设 的大力推进,改变了盆地内的土地利用方式,严重影响了地下水补给径流条件和地下水水质,造成局部地区有害离子的富集。 关键词:空间城镇化;土地利用;水化学质量;水位动态;水城盆地

中图分类号:P66 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2020)01-0123-12 doi: 10.13254/j.jare.2018.0375

The effect of spatial urbanization on the characteristics of shallow karst groundwater in Shuicheng basin

JU Fan-fan, MA Teng^{*}, GU Xu

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the effects of spatial urbanization in Shuicheng basin on shallow karst groundwater, this study analyzed the hydrogen and oxygen isotopes and hydrochemical components of the water at groundwater sampling sites, and water level data at groundwater monitoring sites. Based on an analysis of these data, the groundwater recharge sources and the influence of spatial urbanization on the hydrochemical characteristics and water level dynamics of the karst groundwater were assessed. The results showed that the groundwater in the study area mainly came from atmospheric precipitation, and the main hydrochemical species were HCO_3 -Ca and HCO_3 ·SO₄-Ca. Under the influence of spatial urbanization, the spatial differences in land use types were consistent with the enrichment of many ions in the shallow karst groundwater, and the intensity of human activity had a great influence on groundwater quality. In the study area, the intra- and inter-annual variations in groundwater level tended to be stable. Considering the relationship between rainfall and the spatial variation in groundwater level to rainfall. The condition of groundwater runoff deteriorated, and the variation in groundwater exploitation was the main factor affecting the groundwater level. We can conclude that spatial urbanization has seriously affected the groundwater recharge and runoff conditions and groundwater quality. The changing land use pattern in the basin has resulted in the accumulation of harmful ions in localized areas.

Keywords: spatial urbanization; land use; hydrochemical quality; water level dynamics; Shuicheng basin

收稿日期:2018-12-23 录用日期:2019-04-08

作者简介:巨凡凡(1994—),女,河北石家庄人,博士研究生,主要研究方向为地下水污染与防治。E-mail:1355260530@qq.com

^{*}通信作者:马 腾 E-mail: mateng@cug.edu.cn

基金项目:贵州省公益性、基础性地质工作项目(黔国土资地环函[2014]23)

Project supported : Public Welfare and Basic Geological Work Project of Guizhou Province (Environment, Land and Resources of Guizhou[2014] 23)

城镇化是当今社会经济发展的重要现象和国家 现代化进程的必经之路,城镇化过程中人口相对集 中、产业结构调整,在经济实力增强的同时也对地下 水环境及水循环产生了不同程度的影响^[1]。而岩溶 区地质构造特殊、生态脆弱,地下水环境极易遭到破 坏^[2-3]。因此研究城镇化对浅层岩溶地下水的影响对 实现城镇化与地下水的和谐发展具有现实意义,是城 镇发展规划的内在需求。

六盘水市是贵州省新兴的工业城市,近年来发展 迅速,城镇化水平显著提高。位于该市的水城盆地是 贵州省典型的岩溶分布区,目前对水城盆地内人类活 动引发的地面塌陷研究较多[4-5],叶慧君等[6]应用主成 分分析法对水城盆地岩溶地下水的水化学组分及影 响因素进行了研究,姚长宏等四研究了水城盆地内主 要的人类活动及其引发的负面地质环境效应,但针对 城镇化对水城盆地地下水的水化学质量和水位动态 的影响鲜有研究。20世纪末至今,水城盆地土地利 用方式发生了巨大的改变,建筑用地面积逐年增加, 增加的建筑用地主要占用原来的裸地和耕地,体现了 空间城镇化的发展。而空间城镇化是城镇化的载体, 城镇化水平的推进必然会在空间上体现出来,因此, 衡量城镇化水平的一个重要指标就是建筑用地所占 比重。随着空间城镇化的不断推进,城市建成区面积 不断扩展,城市空间布局格局化,土地利用类型的转 变改变了地下水的下渗条件和人类活动强度,浅层岩 溶水的水质和水位也会发生相应的变化。为此,本研 究以水城盆地为研究对象,通过分析土地利用方式与 浅层岩溶地下水水化学特征和水位变幅的关系,来说 明空间城镇化对浅层岩溶地下水特征的影响。

1 研究区概况

水城盆地位于贵州省六盘水市中心城区,地处东 经104°45′~104°59′、北纬26°32′~26°38′,呈西北-东 南走向,长约22.5 km,宽约5.5~9 km,面积约208 km²,海拔高度在1700~1800 m之间^[7]。年平均气温 12.4℃,年平均降水量1200~1500 mm,雨季主要集中 在5—10月,其降水量约占全年降水量的80%,属亚 热带湿润季风气候,气候温和,冬无严寒,夏无酷暑, 雨热同季,春秋相连。

水城盆地地处长江水系和珠江水系分水岭地带, 为四周高、中间低的断陷盆地,多被第四系地层覆盖, 其他碳酸盐岩地层则主要分布于盆地外围,均裸露于 地表,受新老地质构造控制及古近纪以来气候变迁影

响,盆地内岩溶发育,岩溶地貌类型齐全¹⁸。水城盆 地是一个完整的水文地质单元,隔水层与含水层相 间,沿西北至东南方向呈带状分布。表层第四系地层 是浅部岩溶水的保护盖层,盖层下面岩溶十分发育, 溶沟、溶槽、溶隙、溶管和溶洞相互贯通,蓄水空间大, 导水性好,具有统一的地下水面¹⁹¹。受制于盆地地形 地貌、岩性和岩溶发育条件,水城盆地为一个相对封 闭的岩溶汇水盆地。盆地四周岩溶山区接受的大气 降雨通过岩溶洼地、漏斗、落水洞等补给地下岩溶含 水层,然后由盆地四周向盆地中央汇集,并在盆地中 央形成了自西北向东南的地下水集中径流和排泄带。 盆地南北两侧分别由北向南或由南向北径流,至盆地 边缘受地形切割和第四系覆盖层的阻隔出露了一系 列分散的岩溶泉或小型地下暗河(图1),这些岩溶水 和地下暗河最后也在盆地中央汇集形成了响水河,并 自西向东于头塘转向北排出区外。根据上述水文地 质条件,本区地下水的主要补给来源是盆地四周岩溶 山区的大气降雨入渗,然后通过岩溶洞穴、暗河和岩 溶裂隙向盆地中央径流,天然条件下,在基岩与第四 系接触带及盆地中央响水河以岩溶泉水和暗河的形 式排泄,因此水城盆地是水城岩溶水系统的汇集区, 地下水极为丰富。



图1 水城盆地地下水流网示意图



2 资料与数据来源

本研究选取了2009年9月Landsat5 TM、2015年 9月Landsat8 OLI、2017年9月Landsat8 OLI数据作为 本次土地利用分类遥感解译的基础数据,对研究区的 土地利用类型进行遥感解译,同时收集整理了贵州省 环境监测院2009—2015年六盘水市12个地下水位长 期观测点资料(W1~W12),并于2017年10月在六盘 水市水城盆地采集地下水样品17组(GZ1~GZ17),在 现场用便携式分光光度计测定NH₃-N浓度,采用中 和滴定法测定HCO₃浓度,监测点和采样点的分布如 图2所示,并对地下水样品进行了地下水化学组分以



图 2 研究区监测点和采样点位置分布图 Figure 2 Location of monitoring and sampling points in the study area

及 δD-δ¹⁸O 同位素测试分析。地下水样品阳离子采 用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICAP-6300)、阴离 子采用离子色谱仪(ICP-1100)测试,所有测试水样 阴阳离子电荷平衡误差均在5%以内。氢氧同位素 样品采用液态水同位素仪测定,δD和δ¹⁸O 同位素误 差分别为±0.6% 和±0.2%。以上测试分析均在中国 地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验 室完成。

3 结果与讨论

3.1 岩溶地下水水化学特征

3.1.1 地下水的补给来源

¹⁸O和D(氘)是自然界水体中的稳定同位素,是研究各类水体水汽来源的天然示踪剂,而降水中的氢氧同位素如同遗传因子,是各类水体同位素组成的本质性输入,所以可用氢氧同位素来示踪岩溶地下水的补给来源,判断地下水的形成原因^[10-11]。

本研究共采集17组地下水样品用于氢氧同位素测试,测试结果见表1。同位素最贫化的采样点位于 六盘水市马嘎村的GZ1, 8D和 8¹⁸0值分别为-81.2‰ 和-11.9‰;最富集的样点位于六盘水市乌鸦岩处的 GZ17, δD 和δ¹⁸O 值分别为-67.2‰ 和-10.0‰。所有 水样的δD 均值为-73.2‰,δ¹⁸O 均值为-10.7‰,整体 氢氧同位素值波动不大。查阅相关文献得知,贵州地 区大气降水线方程为δD=8.59δ¹⁸O+17.7¹¹²¹,将所有水 样的氢氧同位素值与此方程一并投到δD-δ¹⁸O 关系 图中,结果如图3所示。研究区内所有水样的δD值 和δ¹⁸O值均聚集于贵州地区大气降水曲线附近,说明 研究区内岩溶地下水以大气降水补给为主。δD 值和 δ¹⁸O 值不存在明显的漂移现象,说明地下水循环交替 快,未受其他水体及介质的影响。

3.1.2 地下水水化学类型

根据水化学测试结果,研究区水化学组分中阳离 子以 Ca²⁺含量为最高,阴离子以 HCO₃和 SO²₄含量为最 高,平均矿化度为 318 mg·L⁻¹。将水化学结果绘制成 Piper 图(图 4),根据舒卡列夫分类,水样的主要水化 学类型为 HCO₃-Ca 和 HCO₃·SO₄-Ca 型,这主要是由 地层岩性和岩溶地下水的水岩相互作用决定的。 Ca²⁺和 HCO₃主要来自于岩溶地层中碳酸盐岩的溶解。 HCO₃·SO₄-Ca 型水样大多处于以页岩、灰岩、砂岩夹 煤线为主的岩性地层,其含有的黄铁矿在地下水中经 过氧化作用会生成 SO²₄。

表1 研究区地下水样品的氢氧同位素测试结果

Table 1 Oxygen and hydrogen isotopic compositions of

groundwa	ter in the study are	ea
样品编号Sample ID	δD/‰	$\delta^{18}O/\%$
GZ1	-81.2	-11.9
GZ2	-79.5	-11.4
GZ3	-73.5	-10.8
GZ4	-71.2	-10.6
GZ5	-73.3	-10.5
GZ6	-69.8	-10.0
GZ7	-73.1	-10.5
GZ8	-72.1	-10.4
GZ9	-75.9	-11.1
GZ10	-71.6	-10.5
GZ11	-74.9	-11.1
GZ12	-74.3	-11.0
GZ13	-68.2	-9.8
GZ14	-69.0	-10.4
GZ15	-73.5	-10.6
GZ16	-76.2	-11.3
GZ17	-67.2	-10.0
平均值	-73.2	-10.7

3.2 空间城镇化对岩溶地下水的影响

3.2.1 空间城镇化对地下水水质的影响

根据相关文献报道,20世纪70年代以前,水城盆 地受人类活动的影响较小,建筑用地较少,盆地周边 大多为茂密的林地和草地,整个盆地基本处于自然状 态,岩溶水化学类型及其基本物质含量受碳酸盐岩化 学成分的控制,盆地内监测的地下水水化学组分可以 作为区域地下水水质的天然背景值,其水化学指标中 除部分细菌指标超标外,化学和毒理学指标均在限值 范围内,是生产和生活的优良水源[13]。进入21世纪 以来,由于城市建设和工农业的不断发展,盆地中心 的建筑用地逐渐增加,盆地周边的次生林地被开垦为 耕地,且石漠化土地增加。2003年,水城盆地内房屋 建筑、道路设施已初具规模,形成以市中心建设为核 心,向外围辐射的城市建设格局,然而,城镇化建设的 步伐并未停止,建筑用地由盆地中心向四周大幅扩 展,盆地内的浅层岩溶地下水受生活和工业污水的影 响,各类有毒有害离子均有检出,地下水水质遭到严 重破坏。由水城盆地地下水水化学变化特征¹⁹(表2) 可知,除K⁺和Cl⁻外,Ca²⁺+Mg²⁺、Na⁺、SO²⁻₄、NO₃和HNO₃ 最高浓度随时间推移不断增大,总体常规离子浓度随 时间推移呈增加趋势,pH呈下降趋势,表明地下水水



图 3 研究区地下水氢氧同位素组成

Figure 3 Oxygen and hydrogen compositions of groundwater in the study area



Figure 4 Piper diagram of groundwater samples

质逐渐变差。

已有研究表明,人类活动强烈的地区地下水水化 学指数浓度更高,证明了土地利用方式对岩溶地下水 水质影响明显¹¹⁴¹。另有学者用Person相关分析和冗 余分析(RDA)法证明了NO₅、Cl⁻、SO²4、Mg²⁺等是受土 地利用类型变化影响较大的几个水化学指标,建筑用 地、耕地和裸地是土地利用类型中对流域水质影响较 为明显的几类,其中Cl⁻浓度与建筑用地面积成正 比¹¹⁵¹。但该学者只是针对其研究区得出的结论,不同 的地区可能会有所差异。依据水城盆地2017年采样 点的水质数据资料,参考《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中地下水三类标准各项指标的限值,可 以看出2017年明显超过标准限值,一般化学指标有

巨凡凡,等:水城盆地空间城镇化对浅层岩溶地下水特征的影响

Mn和NH₃-N,毒理学指标有As。在地下水的主要成 分中,Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃主要来自于碳酸盐岩,NO₃、Cl⁻ 主要来自于污染物,SO²₄既来自于岩石也来自于污染 物^[14],因此本研究另选取NO₃、Cl⁻和SO²₄进行分析。 将NO₃、Cl⁻、SO²₄、NH₃-N、Mn和As指标连同电导率利 用ArcGIS软件中的地统计分析功能进行插值,绘制 其在研究区内的空间分布图,并结合2017年研究区 的土地利用分类图(图5),分析土地利用方式对地下 水水质的影响。

(1)土地利用方式对NO3、Cl⁻、SO²和电导率的影响

由图 6a 可知,NO3浓度由盆地西侧到东侧逐渐增 大,最后形成以GZ11号采样点为中心的高值区,由图 5 可知,此采样点位于建筑用地区,而其南部大多为 耕地覆盖。耕地区农药、农家肥料和化肥的使用较 多,大量含氮有机物进入土壤中或沿溶蚀裂隙、管道 等迅速下渗到地下水中,含氮有机物最终转变为硝酸 盐,硝酸盐在松散沉积物中的迁移能力很强,可以通过土壤顺利进入岩溶水^[16]。且此处为整个盆地的排 泄区,NO₃更为富集。

由图5和图6b可知,Cl在中心城区形成高值区, 而在林地分布较广的东西两侧则浓度较低。一般来 讲,降雨、农药及生活污水中含有氯盐,氯盐不易被土 壤吸收,极易通过土壤进入地下水中,且Cl在岩石风 化中含量较少,主要来自于人为污染。而研究区内 Cl⁻多分布在人口密度大的城区,植被覆盖区浓度较 小,所以建筑用地对Cl⁻浓度的影响最大、耕地次之, 林地和草地最小。由此便可解释位于村寨区域上覆 以林地为主的GZ14和GZ16号采样点处形成Cl⁻浓度 的相对低值区,而位于城镇区域上覆为建筑用地和耕 地的GZ11和GZ13号采样点则在Cl⁻浓度的低值区中 形成相对高值区。

研究区内局部地区关岭组(T2g)地层中含有石膏

表2 水城盆地地下水水化学变化特征¹⁹(mg·L⁻¹)

Table 2 Characteristics of hydrochemical variation of groundwater in Shuicheng basin ⁽²⁾ (m	Shuicheng basin ¹²¹ (mg·L	n Shuicheng basin ^{PI} (mg·L)	ater in Shuicheng basin ^{ei} (m	groundwater in S	variation of	ydrochemical	iaracteristics of !	Table 2
--	--------------------------------------	--	--	------------------	--------------	--------------	---------------------	---------

年代Time	pН	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$	K^{+}	Na^+	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl⁻	HCO ₃
20世纪70年代前	7.00~8.10	29.20~111.53	0.42~1.74	0.22~4.06	10.00~30.00	—	1.00~1.51	146.46~200.00
2003	—	56.38~103.57	0.50~22.00	1.00~37.50	27.20~128.00	0~24.00	0.72~39.34	—
2017	6.68~8.04	51.33~244.86	0.15~9.12	0.82~57.20	14.74~314.58	2.91~37.40	3.08~18.21	69.12~273.60

注:"一"为数据缺失。

Notes:"-" refers to missing data.



Figure 5 The spatial distribution of land use in the study area in 2017

http://www.aed.org.cn



农业资源与环境学报·第37卷·第1期



夹层,岩溶水对膏岩层具有强烈的溶滤作用,SO²-除 来自煤系地层中黄铁矿(FeS2)等硫化物的氧化外,石 膏的溶解也是地下水中硫酸盐的地质成因来源。由 图7可知,地下水SO²/HCO₃和Cl⁻/HCO₃比值以及NO₃/ HCO3和Cl7/HCO3比值之间存在弱正相关关系,表明 地下水中的SO²-、Cl⁻和NO₃离子来源较为相似,人为 输入的可能性较大。生活污水,工矿企业排放的废 水,农业中的农家肥料、化肥以及灌溉水等均可为地 下水提供SO^{2-[17]}。由表2可知,20世纪70年代以前研 究区浅层岩溶地下水 SO²-浓度为 10~30 mg·L⁻¹, 但通 过图 6c 可以看出, 2017 年研究区内 SO²-浓度除极小 部分区域仍为天然背景值外其他均高于30 mg·L⁻¹, 且在GZ13采样点处达到314.58 mg·L⁻¹,远高于研究 区内SO²₄的平均浓度75.83 mg·L⁻¹,说明现阶段研究 区内SO²主要来源于人为污染,结合图5可知,SO²在 林地、耕地和部分建筑用地覆盖区形成了高值区,说明 农业和工业活动对研究区地下水中SO²-的影响最大。

地下水中的电导率是由带电离子产生的,随着离 子浓度的增加,水中的电导率也增加^[18]。在相似的水 文地质条件下,电导率越高表明岩溶水的水质越差。 因此农药和化肥的使用、动物排泄以及生活污水的排 放,均可增加地下水中的离子,从而致使电导率增大。 由图5和图6d可知,研究区内地下水电导率的空间分 布虽未与NO₃、SO²和CI⁻中任一类离子相同,但大致 是三类离子空间分布的综合反映,主要受不同土地利 用方式下人类活动产生的生活污染和工农业污染等 面源污染的影响。

(2)土地利用方式对NH₃-N、Mn和As的影响

由图 8a 和图 8b 可知, NH₃-N和 Mn 均在 GZ5 号采 样点处形成高值中心, 最高浓度分别达 5.080 mg·L⁻¹ 和 0.201 mg·L⁻¹, 远超地下水质量三类标准。而此处 位于凤凰乡, 生活污水排放严重, 所以地下水 NH₃-N 浓度较高, 且其浓度在 0.5 mg·L⁻¹以上的区域主要为 建筑用地覆盖区。结合图 5 可知, GZ5 号采样点的西



图7研究区地下水NO3、SO2+、Cl-关系图

Figure 7 Relation of NO_3^- , SO_4^{2-} and Cl^- in the groundwater of the study area



图 8 研究区 NH₃-N、Mn和As浓度空间分布图 Figure 8 Spatial distribution of NH₃-N, Mn and As concentrations in the study area

北侧有一大型矿山开挖点,含锰工业废水和废渣的排 放使该处形成Mn浓度高值区。由图8c可知,As主要 在GZ2、GZ4、GZ7和GZ8号采样点处形成相对高值 区,浓度最大为0.026 mg·L⁻¹。如图5所示,GZ2和 GZ4号采样点位于城区边缘,四周为耕地和林地覆 盖,As可能主要来自含砷化肥和农药的使用。而GZ7 和 GZ8 号采样点周边分别建有五金厂和焦煤气制造 厂,金属冶炼和燃料燃烧会把砷排入环境中,焦炉煤 气初冷和焦化生产过程均会产生含砷废水,由此造成 地下水砷浓度相对较高。总之,研究区内 NH₃-N受 因人口相对集中造成的生活污染影响较大,而 Mn 和 As则主要来自工业建设产生的点源污染。

http://www.aed.org.cn

贾亚男等四曾对水城盆地1980-2003年土地利 用类型与岩溶水质的关系进行研究,结果表明,从时 间序列上表现为随着人类活动对土地利用类型的改 变,工矿企业等城市建设用地增多,大量林地和草地 被开垦为农田,石漠化加剧,且工矿企业用水大户纷 纷大量开采地下水,造成多处地面塌陷,岩溶水水质 受到严重影响;从空间序列上观察,岩溶水文地球化 学诸多离子的空间富集与土地利用类型也表现出一 定的规律性。21世纪以来,此类状况不仅没有得到 改善,反而进一步加剧,盆地中心的建设用地进一步 向四周扩展,工矿企业用地进一步增多,虽然政府曾 大力实施"退耕还林还草"的政策,且减少了对地下水 的开采,但岩溶地下水水质并未得到改善,与2003年 相比,2017年岩溶地下水 NO3、SO4、Mn 和 As 等浓度 显著增加,且浓度的空间分布也发生了改变,主要受 土地利用方式变化的影响。

3.2.2 空间城镇化对地下水水位的影响

20世纪60年代后期以来,水城盆地内岩溶地下

水以井采和扩泉的方式被大量开采,开采量从20世 纪60年代的1000 m³·h⁻¹,到20世纪70年代的2000 m³·h⁻¹,至20世纪80年代的2800 m³·h⁻¹,20世纪90年 代初约为3000 m³·h⁻¹,1995年开始停止开采地下水。 由于水城第四系盆地下伏岩溶水资源十分丰富,且处 在岩溶水的汇集带上,因此,虽然岩溶水的开采量逐 渐增大,但并没有超过岩溶水资源的天然补给资源 量,地下水动态没有出现持续下降的趋势。1995年 后水城盆地的地下水位可能得到一定程度的回升,但 空间城镇化发展下土地利用方式的改变对地下水动 态变化造成了一定影响。根据监测区 2009—2015年 水位长期观测资料的统计结果,并参考贵阳市年内水 位变幅图^[20],将2、4、6、10m作为年内水位变幅的节 点,利用ArcGIS软件中的地统计分析功能绘制六盘 水市钟山区及周边的年内水位变幅图(图9),结合该 区 2009 年和 2015 年的土地利用分类情况进行分析(图 10),并将各年份中水位变幅的面积进行比对(图11), 运用同样方法绘制年际水位变幅图(图12)。



Figure 9 Intra-annual variation of groundwater level in the study area from 2009 to 2015

(1)年内水位变幅分析

图9展示了2009年后研究区年内地下水水位变 幅由 6~10 m 逐渐减小至以 2~4 m 为主, 且总体趋势 为西北部的水位变幅大于东南部。由图10和表3可 知,2009-2015年,钟山区城区的建筑用地面积增 加,分布于建筑用地周围的裸地和耕地面积减少,部 分转化为建筑用地,部分转化为林地或草地,林地和 草地面积相应增加。结合图9和图10,钟山区及周边 年内地下水水位变幅在6m以下的区域与建筑用地 所在区域逐渐接近,说明水位变幅变化的方向在空间 上与六盘水市城镇化建设的方向一致。按照土地利 用分类的原则,建筑用地主要包括各类建筑物、构筑 物、道路等,地表不透水率较大,影响地下水的补给与 排泄,地下水水位变幅较小。研究表明,各土地利用 类型的不透水率从大到小依次为建筑用地、裸地、耕 地、草地、林地、水体[21]。而2015年建筑用地面积较 2009年大,裸地和耕地面积较2009年小,所以整体地 下水水位变幅也较小。2013年之后,六盘水市大力 推进以退耕还林为主的重点林业生态工程,林地和草 地面积有所增加,所以水位变幅减小至2m以下的区 域在2013年后又恢复至2~4 m。

由图11可知,2009—2014年(2015年降雨量数据 缺失)地下水水位变幅为4~6m和6~10m的面积与





in the study area from 2009 to 2015

六盘水市年降雨量的变化趋势完全一致,随着降雨量的增加而升高。而地下水水位变幅<2 m和2~4 m的面积则与之相反,说明地下水水位对大气降雨的响应是较为敏感的,降雨量的增加可以加速水循环,从而影响地下水水位变幅。但在2011年,地下水水位变幅为2~4、4~6 m与6~10 m的面积出现突变,2~4 m水位变幅的面积由2.03 km²升至79.10 km²,而4~6 m和6~10 m水位变幅的面积分别由39.33、53.90 km²降至14.51、2.35 km²,且水位变幅>10 m的面积在2011年之后变为0,该时间与六盘水市大规模城市建设的时



■ 水体 ■ 建筑用地 ■ 裸地 ■ 草地 ■ 密林地 ■ 疏林地 ■ 耕地 图 10 研究区 2009、2015 年土地利用类型分布图

Figure 10 The spatial distribution of land use in the study area in 2009 and 2015

表3 研究区2009、2015年各土地利用类型面积统计(kn	a^2)
--------------------------------	---------

Table 3 The area of land use in the study area in 2009 and $2015(km^2)$

年份 Year	水体 Water	建筑用地 Building	裸地 Bare land	草地 Grass land	疏林地 Forest	密林地 Bush	耕地 Farm land
2009	6.94	59.90	67.70	15.77	174.84	33.71	349.56
2015	4.16	67.26	7.61	144.30	138.52	129.19	217.94

间一致。2011年之后,地下水水位变幅面积虽与降水量仍存在相应的变化关系,但响应程度降低。这是由于城市建设加大了不透水覆盖层的面积,从而削弱了岩溶区天然漏斗及落水洞的快速补给,水循环路径加长,对季节性降雨的反应迟缓。

(2)年际水位变幅分析

图12反映了地下水水位在年际间的变化,2009— 2011年,钟山区中心城区及西部德坞镇的地下水水 位出现升高现象,依据六盘水市供水量(表4),推测 其原因可能是在降水量基本保持稳定的情况下,地下 水开采量减少,导致水位升高。中心城区以外的大部 分地区地下水水位均有所下降,主要原因是六盘水市 大规模城市建设的持续,钟山区中心城区及德坞镇的 建筑用地向四周扩展,不透水覆盖层面积增加,减少 了地下水垂向补给来源的补给量及补给时间,从而降 低了地下水水位。2011—2013年,钟山区西南部的 大部分地区地下水水位升高,升高区域大多为林地、 耕地和草地,而钟山区东北部主要为建筑用地,地表 多为不透水面。已知研究区为一个四周高中间低的 断陷盆地,即钟山区东北部的地势较西南部高,加之 2012年降水量突增,更多的地表径流由东北部的城 区流向西南部,从而使西南部的地表入渗量增加,地 下水水位抬升。且由表4可知,2012年和2013年六 盘水市地下水及其他水源的供给量明显减少,故推断 地下水水位的升高也可能是由于该地区主要地下水 开采井群陆续停止供水开采。2013—2015年间,钟 山区中心城区及其东北部地下水水位有所降低,同比

表4 六盘水市2009—2015年供水量(亿 m³)

Table 4 Water supply of Liupanshui City from 2009 to 2015

 $(10^8 \, m^3)$

年份	总供水量	地下水及其他水源供给量
Year	Total water supply	Groundwater and other water source supply
2009	7.90	1.07
2010	9.20	0.93
2011	8.26	_
2012	8.83	0.39
2013	7.42	0.38
2014	7.78	0.49
2015	7.83	0.63



图 12 研究区 2009—2015 年年际水位变幅 Figure 12 Variation of groundwater level in the study area from 2009 to 2015

http://www.aed.org.cn

2011—2013年范围向钟山区的西南部延伸,除不透水地面的原因之外,推断是由于2014年和2015年的地下水及其他水源供给量增加。总体而言,2009—2015年间钟山区及周边地下水水位年际变化的趋势是上升区变为下降区、下降区变为上升区,但水位波动大多在1m以内,说明基本处于稳定状态。因此推断不透水面增加导致的入渗补给量的变化与地下水开采量的变化共同影响地下水水位动态且相互制约。

(3)典型监测点水位分析

W4号监测点(钟山区德坞镇彭家寨)四周原为林 地覆盖,后经历了六盘水市的城市化建设,周边虽有 道路零星分布,但仍以林地和草地覆盖为主。W1号 监测点(钟山区凤凰乡赵家寨)在六盘水市城市化建 设前后均为建筑用地覆盖,且两者均位于覆盖型岩溶 区,因两个监测点具有地理位置差异,故选其为典型 案例,分析其多年水位动态。

由图13可知,W4和W1号监测点的水位都存在 一定程度的季节性波动,对一次性降雨的捕捉也极为 灵敏,且水位均在6—10月份出现峰值,但W4号监测 点的水位波动更大,对降雨的响应程度也更灵敏。分 析其原因,W4号监测点处于水城盆地西北部的天然 环境中,洼地、漏斗、落水洞等星罗棋布,地表水可通 过岩溶管道补给地下水;W1号监测点为建筑用地覆 盖,天然漏斗及落水洞的补给条件大大削弱,水循环 路径变长,使其对降雨的响应迟缓,地下水水位变幅 减小,而W4号监测点受城市化建设的影响很小,反 映在水位动态曲线图上是2009—2015年其水位变幅 呈小幅减小趋势。结合表4,六盘水市地下水及其他 水源的供给量2009—2015年先减少后增加,反映在 地下水水位上应是先上升后下降,W1号监测点的水 位更符合此规律,说明地面硬化之后,地下水水位变 化的主要影响因素是地下水开采量的变化而不是降 水入渗。

4 结论

(1)水城盆地岩溶地下水以大气降水补给为主, 且水循环交替迅速。受地层岩性和补给、径流及排泄 条件控制,地下水主要化学类型为HCO₃-Ca和HCO₃· SO₄-Ca型。

(2)20世纪70年代至今,空间城镇化进程下土地 利用方式的改变对水城盆地的地下水水质产生了很 大影响,土地利用方式的空间差异与浅层岩溶地下水 诸多离子的富集具有空间一致性。Cl⁻和NH₃-N主要



monitoring points W4 and W1

富集在建筑用地区,NO3和SO4主要富集在耕地、林地 和裸地等非建筑用地区,其浓度主要受不同土地利用 方式下人类活动产生的生活污染和工农业污染等面 源污染的影响;而Mn和As则主要来自工业建设产生 的点源污染。

(3)2009—2015年,空间城镇化影响下水城盆地 年内地下水水位变幅呈逐渐减小且趋于稳定的趋势, 年际地下水水位变化上升与下降交替出现,最终也趋 于稳定状态。空间城镇化建设导致不透水覆盖层面 积增加,降低了地下水水位对降雨的响应程度,地下 水补给条件变差,水循环路径加长,地下水开采量的 变化成为影响地下水水位变化的主要因素。

(4)虽然水城盆地地下水开采量的减少使地下 水水位趋于稳定状态,但空间城镇化建设的大力推 进,改变了盆地内的土地利用方式,严重影响了地下 水补给径流条件和地下水水质,造成局部地区有害 离子的富集。

参考文献:

^[1] 夏 军, 左其亭. 国际水文科学研究的新进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 256-261.

XIA Jun, ZUO Qi-ting. Advances in international hydrological science research[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(3):256-261.

- [2] Afsin M. Hydrochemical evolution and water quality along the groundwater flow path in the Sandikli plain, Afyon, Turkey[J]. *Environmental Geology*, 1997, 31(3/4):221-230.
- [3] 陈长杰. 桂林东区峰林平原岩溶地下水水化学特征与原因初探 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2016.

CHEN Chang-jie. A preliminary study on the hydrochemical characteristics and causes of karst groundwater in peak forest plain of eastern Guilin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

[4] 何 洋.浅析水城盆地抽水塌陷的形成及治理措施[J]. 岩土工程 界, 2004(6):98-100.

HE Yang. Analysis on the formation and treatment of water pumping collapse in Shuicheng basin[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2004 (6);98–100.

[5]杨先文,申安云,曹建军.水城岩溶盆地地面塌陷及防治[J]. 土工基础, 2002, 16(4):49-51.

YANG Xian-wen, SHEN An-yun, CAO Jian-jun. The subsidence and remedy of ground surface in the karst basin of Shuicheng[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2002, 16(4):49–51.

[6] 叶慧君,张瑞雪,吴 攀,等.基于主成分分析的岩溶水水化学组成及影响因素研究——以贵州水城盆地为例[J].中国岩溶,2017,36
 (2):215-225.

YE Hui-jun, ZHANG Rui-xue, WU Pan, et al. Hydrogeochemical characterization of groundwater and surface water and their influencing factors based on principal component analysis: An example in the Shuicheng basin of Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2):215-225.

[7]姚长宏,杨桂芳,蒋忠诚,等.贵州水城盆地人类活动及其地质环境 效应[J].城市环境与城市生态,2002(5):1-3.

YAO Chang-hong, YANG Gui-fang, JIANG Zhong-cheng, et al. Human activities and their effects on geological environment in Shuicheng basin, Guizhou Province[J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2002(5):1-3.

- [8]肖 攀, 万军伟, 喻 望. 贵州水城盆地岩溶地面塌陷成因分析及防治对策[J]. 桂林理工大学学报, 2015(2):263-268.
 XIAO Pan, WAN Jun-wei, YU Wang. Cause and countermeasures of karst ground collapse in Shuicheng basin[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2015(2):263-268.
- [9] 贾亚男.西南典型岩溶地区土地利用与土地覆被变化对岩溶水质 的影响[D].重庆:西南师范大学, 2004.

JIA Ya-nan. The effects of land use and land cover on karst water quality in three typical karst regions, southwestern China[D]. Chongqing: Southwest Normal University, 2004.

[10] 袁建飞, 邓国仕, 徐 芬, 等. 毕节市北部岩溶地下水水文地球化 学特征[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1):12-21.

YUAN Jian-fei, DENG Guo-shi, XU Fen, et al. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in the northern part of the city of Bijie[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2016, 43(1):12-21.

 [11] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 等. 中国西南地区降水氢氧同位素研究 进展与展望[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4):1094-1103.
 ZHANG Gui-ling, JIAO Yuan-mei, HE Li-ping, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in southwest China: Progress and prospects[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 1094–1103.

- [12] 刘 伟,王世杰,罗维均.贵州荔波岩溶峰丛区表层岩溶泉对大气降雨的响应及其指示意义[J].地球化学,2011,40(5):487-496.
 LIU Wei, WANG Shi-jie, LUO Wei-jun. The response of epikarst spring to precipitation and its implications in karst peak-cluster region of Libo County, Guizhou Province, China[J]. *Geochemistry*, 2011, 40(5):487-496.
- [13] 周济祚.水城盆地喀斯特环境问题[M].贵阳:贵阳人民出版社, 1988.

ZHOU Ji-zuo. Karst environment in Shuicheng basin[M]. Guiyang: Guiyang People's Press, 1988.

- [14] 郭 芳, 姜光辉, 夏 青, 等. 土地利用影响下的岩溶地下水水化 学变化特征[J]. 中国岩溶, 2007, 26(3):212-218.
 GUO Fang, JIANG Guang-hui, XIA Qing, et al. Hydro-chemical variation of karst groundwater under the impact of land use in Donghe catchment, Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(3):212-218.
- [15] 李琳琳.太子河流域土地利用对地表地下水水质的影响研究[D].
 济南:济南大学, 2015.
 LI Lin-lin. The effects of land use on surface and groundwter water

quality in Taizi River watershed[D]. Jinan : University of Jinan, 2015.

[16] 衡 涛,谢世友.重庆南川区不同土地利用类型对表层岩溶泉水水质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(29):16392-16394.
HENG Tao, XIE Shi-you. Effects of different land use types on water quality of surface karst spring water in Nanchuan District, Chongqing [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38 (29): 16392-16394.

[17] 林明珠,谢世友,衡 涛.喀斯特山地不同土地利用对表层岩溶泉水化学特征的影响[J].水土保持学报,2011(4):212-216.
LIN Ming-zhu, XIE Shi-you, HENG Tao. Effects of land use patterns on hydrochemistry of epikarst springs in karst mountains area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011(4):212-216.

- [18] 申献辰. 天然水化学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1994. SHEN Xian-chen. Natural hydrochemistry[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1994.
- [19] 贾亚男, 袁道先.土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(6):831-838.

JIA Ya-nan, YUAN Dao-xian. The impact of land use change on karst water in Shuicheng basin of Guizhou Province[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 58(6):831-838.

[20] 李 洁, 罗朝晖, 顾 栩, 等. 贵阳地区城镇化对浅层地下水的影响分析[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(4):1-9.

LI Jie, LUO Zhao-hui, GU Xu, et al. Effect of urbanization on shallow groundwater in Guiyang area[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, 24(4):1-9.

[21] 邵 歲, 潘文斌. 城市不透水面与降雨径流关系研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2012, 7(4):20-27.

SHAO Wei, PAN Wen-bin. On the relationship between urban impervious surface and rainfall-runoff[J]. *Journal of Subtropical Resources* and Environment, 2012, 7(4):20-27.