

徐州城市供水水源地降落漏斗演变及成因分析

武鑫, 黄敬军, 缪世贤, 姜素, 崔龙玉

(江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210049)

摘要: 徐州市岩溶水强烈开采形成明显的水位降落漏斗, 引发了岩溶地面塌陷、地裂缝、地下水污染等一系列环境地质问题。通过对水源地水位降落漏斗形成演化的分析, 得出研究区水位漏斗演化的3个阶段: 增采阶段-水位下降(20世纪80年代)、控采阶段-水位平稳(20世纪90年代)、压/禁采阶段-水位回升(2000年以来); 地表水资源缺乏、城市生活及工业发展过度依赖岩溶水, 城市化面积增大、有效入渗补给量减小, 矿坑疏干排水、增大岩溶水排泄量等为水位降落漏斗形成演化的主要影响因素; 通过对岩溶水开采量、年平均降水量、土地硬化面积与漏斗水位进行多元相关分析, 得出岩溶水开采量为岩溶水水位持续下降及漏斗形成与演变的主导因素。提出岩溶水超采情况下的水资源保障对策: 控采岩溶水, 制定不同管理目标下的地下水水位控制红线; 修建水库、植树造林, 扩大岩溶水水源涵养区; 利用采空区修建地下水库等, 实现地表水、地下水、矿井水及城市雨水的优化分配。

关键词: 水源地; 水位降落漏斗; 演化特征; 成因机理; 水资源保障对策

中图分类号: TV138

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0151-07

Analysis of evolution characteristics and formation mechanism of groundwater depression cone in water supply source area of Xuzhou City

WU Xin, HUANG Jingjun, MIAO Shixian, JIANG Su, CUI Longyu

(Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China)

Abstract: The intense exploitation of karst water in Xuzhou city formed the obvious groundwater depression cone and triggered the environmental geological issues, such as: land subsidence, karst ground collapse, and groundwater pollution. In this paper, the evolution characteristics and formation mechanism of karst groundwater depression cone were analyzed. The results show that the evolution of karst groundwater depression cones have three development stages: growth of exploitation - water levels fall (the 1980s), control of exploitation - water levels stable (the 1990s), suppression/forbidden of exploitation - water levels recovery (later than 2000). The dominant influence factors of the evolution and formation are those which surface water resources are insufficient, city life and industry development completely rely on karst groundwater, urbanization area is expanded, effective infiltration recharge reduced, and mine drainage. Through the multiple correlation analysis for the cone water level with the karst water production, the average annual rainfall and land of hardening area, the paper concludes that karst water production for the water level of karst water continues to decline and funnel the leading factor in the formation and evolution. Furthermore, the water resources security countermeasures on karst water exploitation are put forward: reducing groundwater exploitation and making the water level control under different management goals, building reservoirs and afforestation to expand the scope of karst water, using mine-out area to build underground reservoir, which can implement optimal allocation of surface water, groundwater, mine water and urban rainwater.

Key words: water supply source; groundwater depression cone; evolution characteristics; formation mechanism; water resources protection countermeasures

收稿日期: 2017-03-15; 修回日期: 2017-03-20

基金项目: 徐州城市地质调查项目、徐州地区岩溶塌陷调查项目(省部级基金项目(12120114022001))

作者简介: 武鑫(1988-), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事地下水科学与工程研究。

徐州市位于江苏省西北部,属华北地层区鲁西分区徐宿地层小区^[1],主要有上元古界青白口系碎屑岩(Qb)、淮河系碎屑岩夹碳酸盐岩(Pt_3H),古生界寒武系-奥陶系碳酸盐岩($\epsilon-O$)、石炭系-二叠系(部分层组缺失)碎屑岩(C-P)。碳酸盐岩覆盖面积约1 800 km²,厚度为3945~5775m^[2],岩溶分布广泛,岩溶水富集。

徐州市是江淮地区最主要的工业城市,地下水是重要的供水水源,地下水供水量约占城市总供水的50%以上,其中岩溶水的开采量又占地下水总开采量的85%以上^[3]。岩溶水强烈开采形成明显的水位降落漏斗,引发了岩溶地面塌陷、地裂缝、地下水污染等一系列环境地质问题^[4-6]。杨丽芝等^[7]以近40年来的深层地下水开采和水位动态监测系列数据为基础,揭示了德州深层水位漏斗形成和演变规律,识别和确定形成水位降落漏斗的主导因素为人工开采;孙超等^[8]通过分析邯郸市不同时期出现的水位漏斗,阐述水位漏斗与降水量、开采量等因素的关系,指出地下水水位下降导致的地质环境问题并提出相应的合理化建议;费宇红等^[9]采用关联度计算分析,认为人类开采地下水是区域地下水水位下降的主导因子;刘沂轩等^[10]通过对徐州丰沛平原区漏斗演变特征及成因机理分析,明确地表水资源缺乏、过度开采地下水等为影响降落漏斗形成的主导因素。

七里沟水源地及丁楼-茅村水源地是20世纪70年代以来徐州市城市供水的两个主要水源地,也是开采量最大的两个水源地。长期的强烈开采导致水源地形成明显的降落漏斗区,自20世纪80年代中后期以来,七里沟-市区一带岩溶水严重超采区内陆续发生多起岩溶地面塌陷^[11]。深入研究七里沟水源地和丁楼-茅村水源地地下水降落漏斗的演变特征及影响因素,提出合理的水资源开发利用方案,为徐州市地下水资源的可持续开发利用和地质环境的保护提供基础。

1 研究区概况

七里沟水源地位于大黄山镇-骆驼山-二堡一带的寒武(ϵ)-奥陶系(O)碳酸盐岩岩溶含水层中,在构造上处在北东向贾汪复式向斜中段(图1)。水源地西侧青白口系新兴组(Pt_3x)和淮河系底层城山组(Pt_3c)的砂岩、页岩构成隔水边界;东侧为潘塘断陷盆地,以白垩系(K)和侏罗系(J)的砂页岩、安山岩为隔水边界;北侧京杭大运河切穿寒武-奥陶

系岩溶含水层,构成定水头补给边界;南侧在二堡一带为七里沟水源地与三堡水源地之间的地下水分水岭,总面积为182 km²,其中灰岩裸露区面积约30 km²。寒武-奥陶系厚层灰岩、白云质灰岩岩溶含水层主要接受上覆第四系孔隙水越流补给以及灰岩裸露区大气降水直接入渗补给。

丁楼-茅村水源地位于义安山-九里山-茅村镇一带的寒武系中上统(ϵ)-奥陶系(O)岩溶含水层中,在构造上处在徐州复式背斜的北西翼和拾屯复式向斜的南东翼,不老河断裂及废黄河断裂横穿水源地(图2),切割新老地层及纵向压性断裂和纵向节理裂隙^[12-13],构成水源地的主要富水断块。水源地西侧二叠系(P)砂岩构成隔水边界;东侧青白口系新兴组(Pt_3x)和淮河系底层城山组(Pt_3c)的砂岩、页岩构成隔水边界;南北两侧则以山脉作为天然分水岭,总面积为245 km²,其中灰岩裸露区面积约25 km²。寒武-奥陶系灰岩岩溶含水层主要接受上覆第四系孔隙水越流补给以及灰岩裸露区大气降水直接入渗补给,在九里山北侧和青山头一带万寨河和京杭运河部分切穿岩溶含水层,也可直接接受地表水的渗漏补给^[14]。

2 降落漏斗演变特征分析

七里沟水源地是徐州市最早的供水水源地,据水源地内监测井及开采井水位资料,水位降落漏斗形成于1976年后,其水位降落漏斗经历了3个不同的变化阶段(增采阶段、控采阶段、禁采阶段),降落漏斗中心水位与漏斗面积变化如图3。

第一阶段(1980-1997年),七里沟水源地岩溶水开采的增采阶段。监测资料显示,1980年水源地内岩溶水年开采量 $3\,460\times 10^4\text{ m}^3$,水位降落漏斗仅分布在城区三官庙一带,15 m等水位线圈定的水位降落漏斗面积13.82 km²,中心水位15.21 m;1985年开采量增至 $5\,052\times 10^4\text{ m}^3$,漏斗面积北扩至火车站,南扩至七里沟,漏斗面积增至24.80 km²,中心水位降到6.82 m,已低于基岩面,1986年诱发了2起岩溶地面塌陷;此后岩溶水开采量仍在不断增大,至1990年七里沟水源地岩溶水年开采量增至 $5\,625\times 10^4\text{ m}^3$,水位降落漏斗继续向外扩张,南扩至铜山区区域,漏斗面积59.69 km²,中心水位4.03 m;1995年水位降落漏斗扩至76.00 km²,中心水位降至2.14 m,1990-1995年间,水位在基岩面上下波动,1992-1993年陆续诱发10起岩溶地面塌陷;1997年开采量增至 $6\,424\times 10^4\text{ m}^3$,漏斗中心水位降至0.89 m,为历史最低值,再次引发3起岩溶地面塌陷。

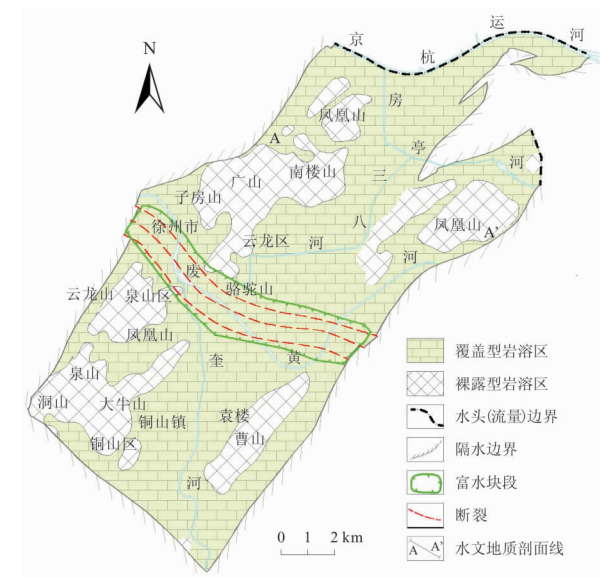


图1 七里沟水源地分布图^[12]

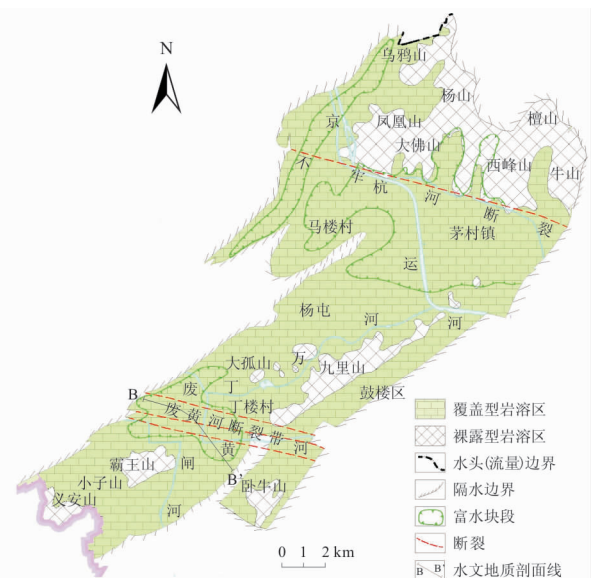


图2 丁楼-茅村水源地分布图^[12]

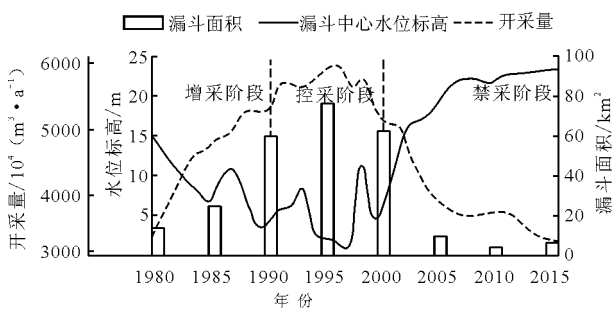


图3 七里沟水源地降落漏斗中心水位与漏斗面积变化曲线图

表1 七里沟水源地水位漏斗演变统计表			
年份	漏斗中心 水位标高/m	水位漏斗 面积/km ²	开采量/ 10 ⁴ (m ³ · a ⁻¹)
1980	15.21	13.82	3460.2
1985	6.82	24.80	5051.6
1990	4.03	59.69	5624.7
1995	2.14	75.92	6299.9
2000	6.16	62.53	5391.1
2005	19.99	9.54	3808.5
2010	22.47	4.26	3680.8
2015	23.37	6.40	3106.2

第二阶段(1998-2000年),七里沟水源地岩溶水开采的控采阶段。为防止岩溶地面塌陷地质灾害的发生,调整供水开采井布局,并逐步关闭自备水源井,岩溶水年开采量由 $6\,424 \times 10^4 \text{ m}^3$ 减小至 $5\,391 \times 10^4 \text{ m}^3$,水位开始回升,降落漏斗逐渐变小。监测资料显示,2000年漏斗则减至 62.53 km^2 ,中心水位回升至 6.16 m 。

第三阶段(2001-2015年),七里沟水源地岩溶水开采的禁采阶段。因水源地补给区的农药厂四氯化碳污染,2003年逐步关闭了该水源地的开采,至2005年水位降落漏斗迅速缩至 9.54 km^2 ,中心水位升至 19.99 m ,2010年水位降落漏斗面积仅 4.26 km^2 ,漏斗中心水位已回升至20世纪80年代初期水平,开采量也明显减小,至2014年水源地岩溶水年开采量减小至 $3\,106 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。此后,区域水位降落漏斗消失,仅在零星开采区存在小区域季节性的水位降落漏斗(图4、表1)。

丁楼-茅村水源地是徐州市供水的重要水源地,开采虽晚于七里沟水源地,但由于开采集中心,水位降落漏斗发展迅速,其水位降落漏斗同样经历了3个不同的变化阶段(增采阶段、控采阶段、压采阶段),降落漏斗中心水位与漏斗面积变化如图5。

第一阶段(1980-1995年),丁楼水源地岩溶水开采的增长阶段。开采集中心在城区九里山-小山子一带,年开采量 $2\,044 \times 10^4 \text{ m}^3$,由 15 m 等水位线圈定的水位降落漏斗面积仅 8.24 km^2 (1980年),中心水位 10.25 m ,至1985年开采量增至 $4\,632 \times 10^4 \text{ m}^3$,漏斗迅速向丁楼扩展,漏斗面积增至 29.35 km^2 ,中心水位 3.65 m 。随着丁楼-大彭一带开采强度的加大,至1987年水源地岩溶水开采量达 $5\,125 \times 10^4 \text{ m}^3$,水位降落漏斗扩展至丁楼村,至1990年水位降落漏斗面积达 108.42 km^2 ,中心水位降至 -2.28 m ,随着茅村、彭城等电厂的出现,茅村水源地开采量急剧增加,两个原本独立的水位降落

漏斗连成一片,1995 年漏斗面积达 182.49 km²,九里山-小山子一带漏斗中心水位降至 -12.12 m,大彭镇丁楼村也出现局部水位降落漏斗。

第二阶段(1996-2005 年),该阶段是丁楼-茅村水源地岩溶水开采的控采阶段,水源地岩溶水开采量呈现先减小后增大的变化趋势,由 3 285 × 10⁴ m³ (1996 年)减小至 2 851 × 10⁴ m³ (1998 年),至 2005 年开采量又增至 4 373 × 10⁴ m³。其中,九里山-小山子一带开

采强度减小,水位回升,而工业集聚的大彭、茅村开采量仍然增大,漏斗中心逐渐向大彭镇丁楼村转移,至 2000 年于九里山-小山子、丁楼村形成 2 个降落漏斗,中心分别为 -11.14 m、-12.91 m,漏斗面积达 197.48 km²,涉及整个丁楼-茅村水源地;至 2005 年,位于九里山-小山子 的水位降落漏斗逐渐减小,水源地漏斗中心转移至大彭镇丁楼村,中心水位 -11.31 m,漏斗面积 180.36 km²。

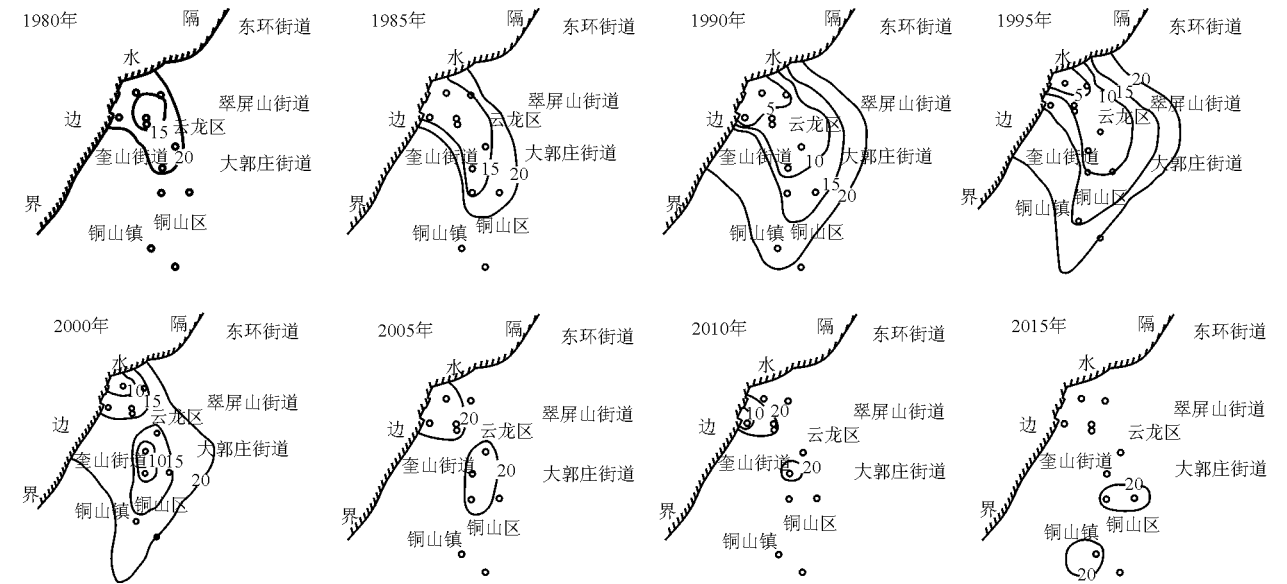


图 4 七里沟水源地岩溶水降落漏斗演变图

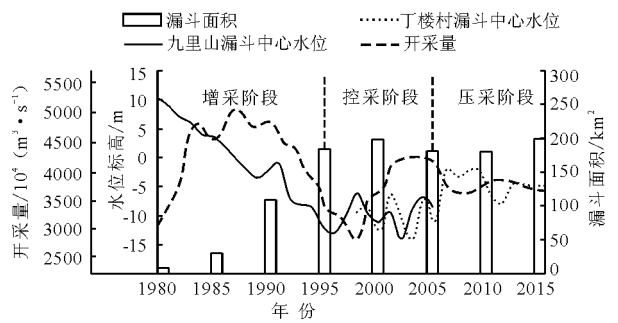


图 5 丁楼-茅村水源地降落漏斗中心水位与漏斗面积变化曲线图

第三阶段(2006-2015 年),该阶段是丁楼-茅村水源地岩溶水开采的压采阶段,城区九里山-小山子开采井全部关闭,至 2015 年岩溶水开采量 3 971 × 10⁴ m³,使该区域的水位降落漏斗消失,漏斗中心转移至大彭,漏斗面积维持在 200 km² 左右,中心水位 -2 ~ -10 m(图 6、表 2)。

3 降落漏斗成因分析

3.1 地表水资源缺乏,岩溶水开采强烈、年超采量严重

徐州市地表水资源时空分布极不均匀,汛期 6

-9 月降雨集中期,强度大、历时短,多属暴雨;且年际变化大,徐州市枯水年降雨量 695.6 mm,丰水年降雨量 958.2 mm,平水年降水量 840.2 mm,丰水年与枯水年降雨量相差 2~3 倍,年降雨量呈下降趋势(图 7)。区内河流多为季节性河流,对水资源的调蓄能力较低,兴建的刘湾水厂及骆马湖水厂远离城区,供水成本较高,城市生活及工业用水过度依赖岩溶水,供水水源单一,导致岩溶水降落漏斗的形成。

以七里沟水源地为例,参考《徐州市地下水资源调查评价报告(2001 年)》及《江苏省徐州市城市供水水文地质勘察报告(1985 年)》,计算得该水源地天然补给量 4106 × 10⁴ m³/a,可采资源量为 3 912 × 10⁴ m³/a。据 1980-1992 年开采量与漏斗中心水位对比可知(表 3),该阶段七里沟水源地岩溶水的开采量逐年增加,1980-1981 年岩溶水开采量仍在可采范围内,1982 年开始出现超采现象,超采量亦逐年增加。同时该阶段也是地下水水位的主要下降时期,漏斗中心水位由 1980 年的 15.21 m 下降至 3.88 m(基岩面标高 11.61m),下降速度为 1~2 m/a,导致在漏斗中心内先后于 1986 年、1992 年发生多起岩溶地面塌陷。

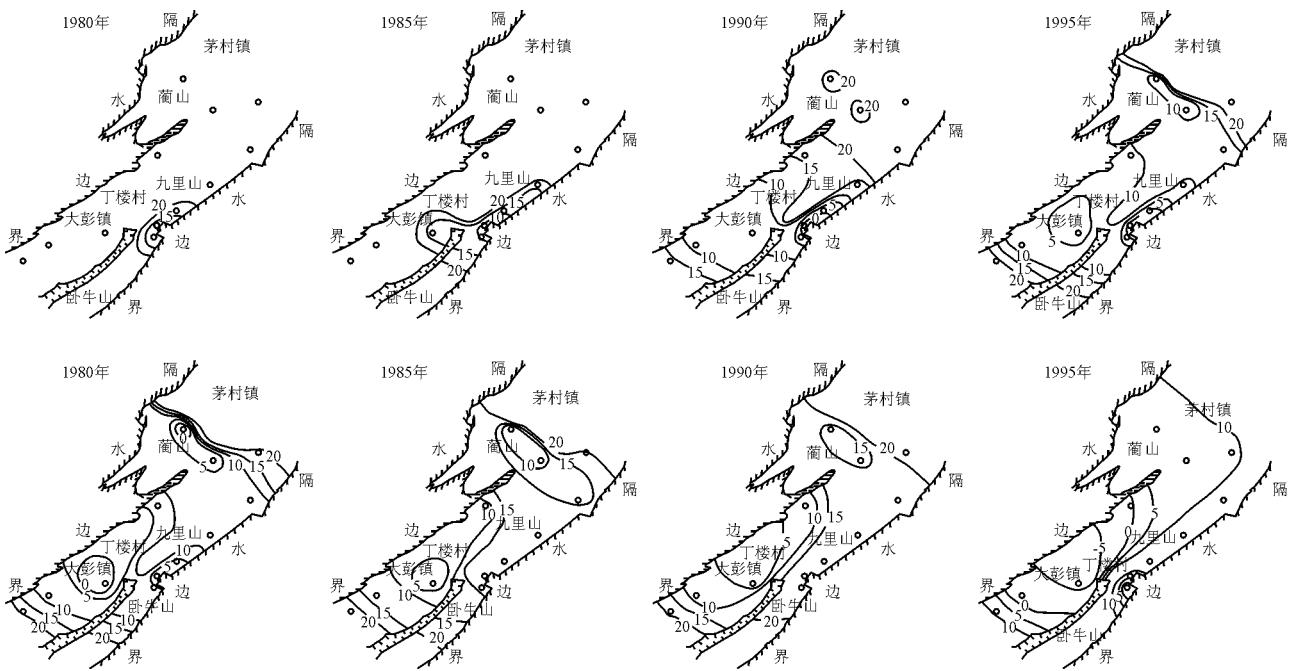


图6 丁楼-茅村水源地位水位漏斗演变图

表2 丁楼-茅村水源地位水位漏斗演变统计表

年份	九里山漏斗中心 水位标高/m	丁楼村漏斗中心 水位标高/m	水位漏斗 面积/km ²	开采量/ 10 ⁴ (m ³ · a ⁻¹)
1980	10.25		8.24	3230.7
1985	3.65		29.35	4631.9
1990	-2.28		108.42	4894.7
1995	-12.12		182.49	3361.6
2000	-11.14	-12.91	197.48	3664.6
2005	-9.18	-11.31	180.36	4373.3
2010		-6.13	180	3384.6
2015		-4.99	200	3971.2

增至43%^[15],这种变化随着城市化的发展、土地硬化面积率的增大而增大。据概化计算,徐州城市综合径流系数由1978年的0.22增至2006年的0.69^[16],毋庸置疑,土地硬化化面积增大(表4),改变了原有的自然生态本底和水文特征,破坏了自然“海绵体”,使城市综合径流系数增大,造成径流排泄量增大,减少了降水对岩溶水的入渗补给量。

京杭大运河、不牢河等地表水渗漏补给岩溶水的河段及废黄河开窗补给岩溶水的河段,随着城市扩张,进入城区的河道基本硬化化,亦减少了河道对岩溶水的侧向入渗量。

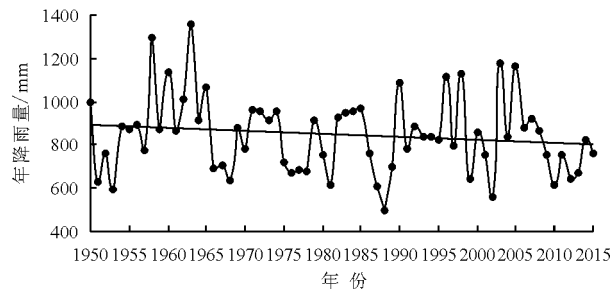


图7 徐州市年降雨量变化特征曲线(1950-2015年)

3.2 土地硬化化,降雨径流排泄量增大,入渗补给量减少

天然地表具有良好的透水性,雨水降落后,植物截留、蒸发、填洼、下渗,地表径流都按照一定的比例循环运动。据北美洲安大略环境部资料,城市化前后,入渗地下水量可由50%减少至32%,地表径流量则由10%

表3 七里沟水源地位开采量统计表

年份	天然补给量/ 10 ⁴ m ³	可采资源量/ 10 ⁴ m ³	年开采量/ 10 ⁴ m ³	年超采量/ 10 ⁴ m ³	漏斗中心 水位/m
1980	4106	3912	3460	0	15.21
1981	4106	3912	3905	0	12.96
1982	4106	3912	4300	388	11.03
1983	4106	3912	4705	793	9.39
1984	4106	3912	4778	866	8.00
1985	4106	3912	5052	1140	6.81
1986	4106	3912	5074	1162	9.80
1987	4106	3912	5376	1464	10.75
1988	4106	3912	5563	1651	7375
1989	4106	3912	5515	1603	3.88
1990	4106	3912	5625	1713	4.03
1991	4106	3912	6106	2194	5.86
1992	4106	3912	6081	2169	6.16

表 4 徐州市土地硬化化面积统计表

年份	硬化化 面积/km ²	年份	硬化化 面积/km ²	年份	硬化化 面积/km ²
1980	10.29	1992	24.65	2004	39.34
1981	11.05	1993	26.22	2005	59.94
1982	11.74	1994	26.90	2006	60.79
1983	12.76	1995	27.51	2007	63.04
1984	13.11	1996	28.70	2008	65.84
1985	14.67	1997	29.80	2009	65.97
1986	18.63	1998	31.04	2010	84.63
1987	19.64	1999	33.37	2011	75.81
1988	20.30	2000	35.37	2012	79.92
1989	21.45	2001	35.07	2013	86.68
1990	22.45	2002	36.50	2014	92.56
1991	23.52	2003	38.35		

3.3 矿坑疏干排水,增大岩溶水排泄量

徐州是全国重要煤炭能源基地之一,已有 130 多年的开采史,几十座矿井与岩溶水水源地相间分布,为“水煤共存”的岩溶水系统,具有“煤在楼上,水在楼下”的结构特点^[17]。虽然矿坑排水非寒武系、奥陶系岩溶水,为石炭系、二叠煤系地层的裂隙水,但断裂构造与裂隙的发育使裂隙水与岩溶水存在一定的水力联系,煤系地层裂隙水的疏干,造成裂隙水和岩溶水之间的水动力平衡破坏,而采空塌陷对含水地层的破坏产生的导水裂隙带又增加了岩溶水系统与裂隙水系统沟通通道,矿井排水导致的区域地下水位下降强烈影响城市供水水源地的地下水资源储存量^[18]。例如位于七里沟水源地东北腹地的大黄山煤矿,根据煤矿历年平均涌水量及实际开采年限统计了该矿在生产过程中消耗地下水总水量为 $41\,943\times10^4\text{ m}^3$,其中消耗岩溶水源地奥灰水总水量为 $16\,777\times10^4\text{ m}^3$ 。

3.4 影响因素的多元相关分析

水源地水位漏斗扩展的影响因素主要有岩溶水开采量、年平均降水量、土地硬化面积、矿坑疏干排水等,但这些因素对水位下降的影响程度并不相同。采用 SPSS 软件的 Analyze 分析板块^[7]对以上影响因素进行多元相关分析,得出七里沟水源地的岩溶水开采量、年平均降水量、土地硬化面积与降落漏斗中心降深之间的相关系数为: $R_Q = 0.948, R_P = 0.331, R_A = 0.791$;丁楼 - 茅村水源地的岩溶水开采量、年平均降水量、土地硬化面积与降落漏斗中心

降深之间的相关系数为: $R_Q = 0.559, R_P = 0.049, R_A = 0.08$ 。由此可知,岩溶水水位持续下降及漏斗形成与演变的主导因素是岩溶地下水的开采。

4 岩溶水超采下的水资源保障对策

岩溶水强烈开采形成地下水水位降落漏斗,引发了地裂缝、岩溶地面塌陷、地下水污染等一系列环境地质问题。

七里沟水源地因农药厂四氯化碳污染而逐步关停开采,水位迅速回升,水位降落漏斗逐渐变小乃至消失,2000 年后也未再发生岩溶塌陷地质灾害,显然,岩溶水控采可解决水资源衰竭与岩溶塌陷防控问题。虽然逐步建立以微山湖、骆马湖为水源的地表水厂,但供水依然以岩溶水为主,供水结构不合理。因此,要逐渐转变地下水管理方式,从过去基于地下水可开采资源量的管理模式转化为地下水水位红线的管理模式,制定不同现状水平年情景下(丰水年、平水年、枯水年)、不同规划管理阶段目标下地下水水位红线。在岩溶水水源的补给区修建水库或拦截坝,植树造林,减少土地硬化,扩大岩溶水水源涵养区,使更多优质的雨水资源转化为岩溶水资源,提高岩溶水的可更新能力。利用停采矿山的采空区,论证作为储水空间的可行性,计算采空区“地下水库”的供水库容,评价采空区“地下水库”的供水能力;同时,还要利用采煤塌陷区积水,因地制宜利用采煤塌陷地建人工湿地或人工水库,论证作为城市供水水源的可行性。从而实现水资源的科学调度,实行地表水、地下水、矿井水、城市雨水以及过境水的优化分配、联合调度,减少对岩溶水的长期开采,逐步过渡为应急状态的后备水源。

5 结 论

自 20 世纪 80 年代开始,由于长期超采岩溶地下水,导致徐州市岩溶水水位逐年下降,并在七里沟水源地和丁楼 - 茅村水源地等区域形成岩溶水水位降落漏斗,同时在漏斗范围内先后发生 13 起岩溶塌陷,造成房屋开裂、地基下沉、铁路中断等后果,严重制约当地的经济发展。

本文着重分析徐州市两个主要供水水源地降落漏斗中心水位逐年变化情况,将岩溶水降落演化过程划分为 3 个阶段:增采阶段(20 世纪 80 年代)、控采阶段(20 世纪 90 年代)、压采/禁采阶段(2000 年以来),受岩溶水开采量的直接影响,漏斗中心水位呈现不同的特征。增采阶段,岩溶水水位随着开采量的增

大不断降低,水位漏斗的面积迅速扩大;控采阶段,岩溶水开采量得到控制,降落漏斗面积逐渐减小,漏斗中心水位开始回升;压采/禁采阶段,岩溶水开采量迅速减小,水位降落漏斗面积明显减小,漏斗中心水位显著回升,七里沟水源地漏斗中心水位现已基本回到开采初期水平。

徐州市岩溶水水位降落漏斗形成的主要因素:地表水资源缺乏、供水水源单一,岩溶水开采强烈、储存资源量减少,土地硬化面积增大、入渗补给量减小,矿坑疏干增大岩溶水排泄量。通过对岩溶水开采量、年平均降水量、土地硬化面积与漏斗中心水位进行多元相关分析,结合水位漏斗演变规律,得出岩溶水开采量为岩溶水水位持续下降及漏斗形成与演变的主导因素。

徐州市岩溶水强烈开采引发了岩溶地面塌陷、地裂缝、地下水污染等系列环境地质问题,通过转变地下水管理方式、优化水资源配置、控采岩溶水等措施有效控制水位降落漏斗,有效解决水资源衰竭与岩溶塌陷防控问题。

参考文献:

- [1] 熊彩霞,刘沂轩. 徐州市地面塌陷与岩溶水开采关系研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):80-82.
- [2] 赵厚舜,田颖. 江苏省徐州地区岩溶地下水赋存规律探讨[J]. 地下水,2014,36(6):65-67.
- [3] 韩宝平,周东来,赵林,等. 徐州市岩溶水开发过程中的环境地质问题[J]. 中国岩溶,1994,13(2):107-115.
- [4] 胡昌林. 徐州市岩溶水开发过程中的环境地质问题[J]. 水文地质工程地质,1998,40(5):36-38+62.
- [5] 黄敬军,张丽,缪世贤. 江苏省地下水开发利用中的环境地质问题及对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,

2014,25(4):101-107.

- [6] 杨丽芝,刘春华,刘中业. 德州深层地下水开采引发地面沉降变化阈值识别[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):55-60.
- [7] 杨丽芝,刘中业,刘春华. 德州深层地下水位漏斗形成主导因素识别与可恢复性研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(6):9-15.
- [8] 孙超,赵文莲,商磊,等. 邯郸市市区地下水水位漏斗演化特征[J]. 地下水,2015,37(1):54-56.
- [9] 费宇红,苗晋祥,张兆吉,等. 华北平原地下水降落漏斗演变及主导因素分析[J]. 资源科学,2009,31(3):394-399.
- [10] 刘沂轩,熊彩霞. 徐州丰沛平原区深层地下水降落漏斗演变特征及成因机理研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2014,35(5):13-15.
- [11] 郭飞,刘建立,朱学愚. 徐州地区裂隙岩溶水资源问题研究[J]. 中国岩溶,2002,21(4):263-268.
- [12] 贾晓娟,韩宝平. 北西向断裂对徐州市岩溶水的控制作用[J]. 煤炭科技,1996(4):25-26.
- [13] 陈丁,张景发,朱鲁,等. 徐州废黄河断裂带的空间展布与活动性研究[J]. 地震地质,2011,33(1):67-78.
- [14] 胡昌林,曹志猛,陈国富,等. 江苏省徐州市城市供水水文地质勘察报告[R]. 江苏省地质矿产局第二水文地质工程地质大队. 1985.
- [15] 杨士弘. 城市生态环境学[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [16] 薛丽芳,谭海樵,孔祥光. 基于水安全的徐州城市发展策略[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(5):516-522.
- [17] 梁永平,王维泰,赵春红,等. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶,2013,32(1):34-42.
- [18] 许爱芹,刘喜坤. 快速城市化条件下地下水开发的环境效应研究[J]. 徐州师范大学学报(自然科学版),2008,26(1):68-71.

(上接第150页)

- [6] 邓辉,王克彬. 万家寨水库汛期防洪调度风险分析[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(5):61-64.
- [7] 袁晶瑄,王本德,田力. 白龟山水库防洪预报调度方式研究及风险分析[J]. 水力发电学报,2010,29(2):132-138.
- [8] 何晓燕,黄金池. 对水库汛限水位动态控制风险分析的认识[J]. 大坝与安全,2010,22(6):27-30.
- [9] 王本德,周惠成. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [10] 朱永英,袁晶瑄,王国利,等. 实时预蓄预泄法汛限水位动态控制与应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(4):606-609.

- [11] 郑雄波,李华穗,刘雪玉. 基于泄量约束法的汛限水位动态控制[J]. 水电自动化与大坝监测,2011,35(6):70-73.
- [12] 贺平,刘松. 丹江口水库汛限水位动态控制的可行性研究[J]. 人民长江,2012,43(2):36-38.
- [13] 李旭光,王本德. 基于洪水预报调度方式的汛限水位设计方法探讨[J]. 水力发电学报,2009,28(3):52-56.
- [14] 贵阳勘测设计研究院有限公司. 陕西汉中石门水库除险加固工程初步设计报告[R]. 2015,11.
- [15] 王义民,吴成国,李程,等. 基于不同预泄调度模式的喜河水库汛限水位动态控制研究[J]. 水力发电学报,2011,30(2):26-31.