超星·期刊

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2023.02.09

太行山前平原浅层地下水年龄及其对含水层固有脆弱性的指示意义

刘宏伟[1,2,3],王国明[1,2*],高明达[4]

(1.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170; 2.中国地质调查局华北地质科技创新中心,天津 300170; 3.中国地质科学院,北京 100037; 4.河北省木兰围场国有林场新丰分场,河北 承德 068450)

摘 要: 地下水资源在生产和生活供水中占有重要地位,然而随着人类活动的不断增强,很多地区出现了地下水污染的现象,使得地下水保护研究成为一项势在必行的工作。已有研究显示,地下水年龄可以指示含水层固有脆弱性程度,反映地下水的潜在污染风险性。本次以太行山前平原为研究区,利用$^3H(^3H/^3He)$同位素识别了浅层地下水年龄并探讨了其对含水层固有脆弱性的指示意义。结果显示,研究区浅层地下水年龄普遍小于40年,由山前至平原沿地下水流动方向呈现增大特征,并呈现较好的分带性。同时,通过对比前人提出的地下水中现代水的含量指示含水层固有脆弱性的方法,揭示地下水年龄的分布,对含水层固有脆弱性亦具有较好的指示意义。结果显示,研究区含水层固有脆弱性由山前到平原呈现降低趋势,并利用其他指标和数据进行了验证和讨论。

关键词: 地下水年龄;固有脆弱性;含水层;指示;太行山前平原

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 2097-0188(2023)02-0063-06

地下水作为水资源的重要组成部分,成为生活用水和工农业生产的重要水源,人类对地下水的依赖程度越来越高[1-3]。但受人类活动的影响,部分地区出现了地下水污染、水质恶化等环境问题[4-7]。地下水一旦遭受污染,其治理难度很大,且成本较高[8-9]。因此,如何保护地下水资源免受污染或减少受污染风险就显得尤为重要。地下水年龄可以指示含水层中地下水的更新速率,对地下水的固有脆弱性也具有重要指示意义[10-12],是开展地下水资源保护研究的一项基础性工作。

目前,用于年轻地下水测年较为常用的方法主要有^3H(氚)法、CFCs(氟里昂)法和$^3H/^3He$(氚氦)法[13]。^3H测年是应用最广泛的方法,但是随着其不断衰变致使浓度大幅降低,其优势逐渐被$^3H/^3He$和CFCs等方法替代。CFCs测年是确定1950年以来地下水年龄的有效方法,但是,由于其在水中降解及易受工业CFCs点源污染等的影响,增加了该方法测年的不确定性[14]。相对而言,$^3H/^3He$法是目前适用于年轻地下水年龄测定的有效工具之一,韩庆芝等学者开展了该方法的案例研究[15]。鉴于样品数量有限,本次选择$^3H/^3He$法和^3H法结合来计算地下水年龄。

Gellermann[16]等、Andrew[13]等提出了地下水的脆弱性与地下水年龄、年轻地下水(现代水)含量之间的对应关系,为利用放射性同位素指示地下水固有脆弱性研究提供了理论依据。几十年来,很多国内外学者应用同位素方法(或结合应用其他方法)进行了地下水脆弱性研究(表1)。

1 研究区概况

研究区位于石家庄太行山前倾斜平原地带,地面高程约60~110 m,地势西高东低,地形坡度0.5‰~2.5‰,属温带大陆性季风气候区,多年平均气温约13℃,多年平均降水量约570 mm,主要分布滹沱河和石津灌渠等地表河流和人工水渠(图1)。地下水主要赋存于第四系松散岩层孔隙中,包气带岩性以砂性土为主,含水层自上而下划分为四个含水层组,本次研究的对象是浅层地下水,即区内第I、II含水层组,两含水层组之间没有相对连续的隔水层和弱透

收稿日期: 2023-02-23

资助项目: 中国地质调查局项目"京津冀暨雄安新区资源环境承载能力监测评价(DD20221727)"

作者简介: 刘宏伟(1982-),男,硕士,正高级工程师,主要从事水工环地质、城市地质、国土空间等研究工作,Email: liuhenry022@163.com;*通讯作者:王国明(1982-),男,硕士,高级工程师,环境地球化学专业,主要从事环境地质、水工环地质研究工作,Email:470383057@qq.com。

超星·期刊

表1 同位素法研究含水层地下水脆弱性实例一览表

Table 1 Groundwater vulnerability study cases with isotopic methods

发表时间/(年)	主要作者	主要指标	研究对象
1990	Gellermann 等[16]	^{3}H、^{14}C 年龄及 NO_3^-	三叠系和二叠系含水层
1995	Fernando 等[17]	D, ^{18}O	马德里盆地含水层
2003	Nelms 等[18]	$^{3}H/^{3}He$ 年龄，水化学和 ^{3}H、D、^{18}O	美国维吉尼亚州含水层
2005	Moran 等[19]	$^{3}H/^{3}He$ 年龄，挥发性有机组分 VOCs	加利福尼亚州 Central Vally 深部含水层
2006	Koh 等[20]	$^{3}H/^{3}He$ 和 CFC 年龄	韩国 Jesu 岛地下水
2012	张翼龙等[21]	^{3}H、^{14}C 含量和年龄，DRASTIC 指标	呼和浩特市地下水
2012	Molson 等[22]	地下水平均年龄，预期寿命等	加拿大沃特卢 Moraine 含水层
2020	Edward 等[23]	^{3}H 年龄，水化学和 D、^{18}O	西非 White Volta 河流域花岗岩含水层

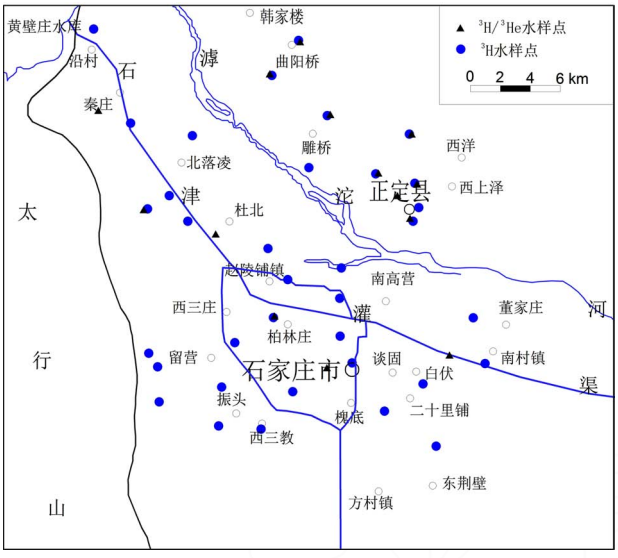

图1 研究区位置及样点分布图

Fig.1 Location of study area and groundwater isotopic sites

水层，水力联系密切，岩性主要为砂砾石夹中粗砂及亚砂土和亚粘土。自西向东，含水层厚度由厚变薄，粒度由粗变细，结构由少增多，富水性由强至弱，中东部含水层底板埋深大于50 m。地下水动态受气候和人类活动共同影响，地下水补给以大气降水入渗和侧向径流补给为主，地下水排泄方式主要为人工开采和蒸发，地下水总体由西北向东南方向流动。

2 数据来源

本次研究所采用的地下水同位素、水化学、地下水位埋深等基础数据主要来源于已经公开发表的文献[24-26]和中国地质科学院水环所调查报告资料。采用的 $^{3}H/^{3}He$ 样品数量为14件，^{3}H 样品数量为45件（其中有部分样品取样位置较为临近）。

3 浅层地下水年龄

根据 $^{3}H/^{3}He$ 年龄的计算原理并结合文献资料[13,27]，得出研究区 $^{3}H/^{3}He$ 浅层地下水样点的同位素年龄介于5~36年（图2）。基于 $^{3}H/^{3}He$ 年龄来矫正地下水 ^{3}H 年龄，地下水 ^{3}H 年龄通过 Flowpc 3.1 程序定量计算[28]。根据大气降水氚恢复输入函数[12]，给定一系列滞留时间，计算得到氚输出浓度，根据实测样品的氚含量，对比计算的输出浓度，得到不同样品点的平均地下水年龄（图3）。

由地下水同位素年龄来看，自西向东地下水年龄呈现逐渐增大特征（图4）。西部山前地区地下水年龄小于5年，石家庄漏斗区地下水氚年龄在10年左右。以漏斗为中心，向南到方村镇地下水年龄增大到20年左右，向东和东北方向年龄也呈增大趋势。同时可发现，从石家庄到正定方向穿过滹沱河之前地下水年龄出现南北向低值（≤10 a）区，推断该区为

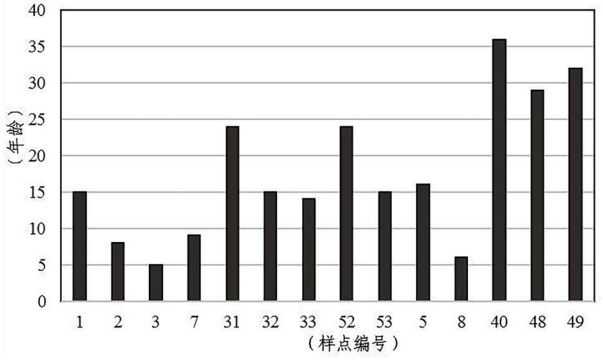

图2 地下水 $^{3}H/^{3}He$ 年龄结果

Fig.2 Groundwater $^{3}H/^{3}He$ isotopic ages of samples

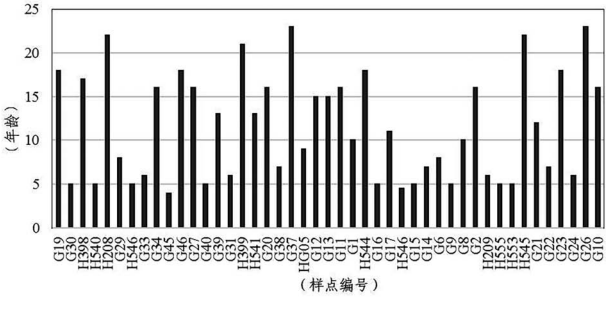

图3 地下水氚年龄结果

Fig.3 Groundwater ^{3}H isotopic ages of samples

超星·期刊

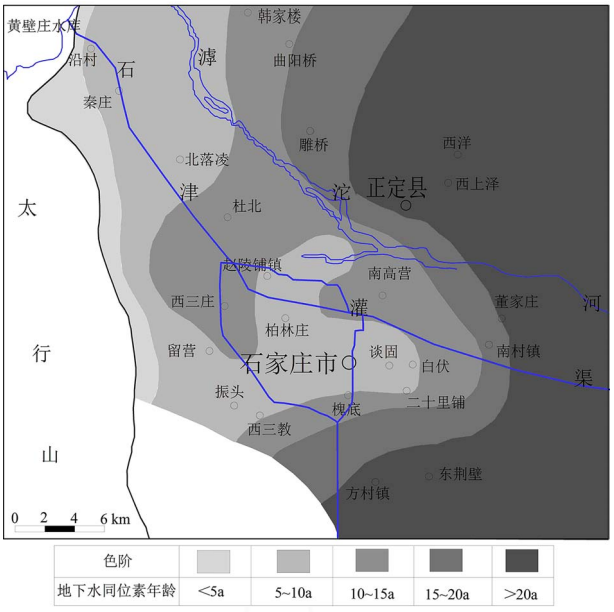

图4 地下水同位素年龄分区图

Fig.4 Partition map of groundwater isotopic ages

滹沱河补给石家庄地下水的优先补给带。依据年龄分布,本次按照5a间隔为等值线,将地下水年龄由高到低划分为I-V五个区(图4),呈现较为明显的分带性。

4 地下水年龄对含水层固有脆弱性的指示

前人研究结果显示[13,16,29],分析地下水中现代水的含量也可以指示含水层固有脆弱性或可能的污染风险。根据Andrew[13]等的研究成果,可根据现代水的含量将地下水划分为Unmixed(未混合型Un)、Modern(现代型M)、Modern/Pre-bomb(混合M/P)和Pre-bomb(古水含量≥80%的P型)型。区分不同类型地下水的关键是分类界线的划定,根据研究区实际水文地质条件和研究精度,本次研究暂不划定P型(图5),故而可将14个样品按脆弱性高低程度分为三组(图5、表2)。

为了对比根据现代水含量评价脆弱性和根据地下水年龄指示脆弱性的结果,我们将分组结果与样品的计算年龄值做对比(表3)。可以发现,除个别点(点53),地下水年龄分组结论与根据现代水含量分组结论取得了很好的一致性。

综上所述,地下水年龄对含水层固有脆弱性具有较好的指示作用,地下水年龄相对较小的含水层固有脆弱性呈现出相对较高的特征。

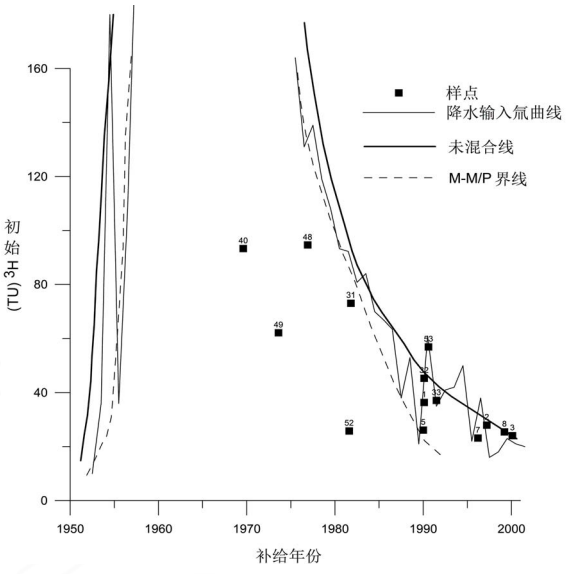

图5 $^3H/^3He$数据确定现代水含量

Fig.5 Determination of modern groundwater content by $^3H/^3He$ data

表2 现代水含量评价地下水脆弱性结果

Table 2 Groundwater vulnerability based on modern water content

组别	水样编号	现代水含量	脆弱性等级	分级标准
第一组	3, 8,53	≈100%	①高	Un
第二组	1,2,5,7,32,33	80%~100%	②中	M
第三组	31, 48,40,49,52	< 80%	③低	M/P

表3 年龄与现代水含量指示的脆弱性评价结果对比

Table 3 Comparison of vulnerability between ground water age and modern groundwater content indicators

脆弱性等级	按现代水百分含量分组		按地下水年龄分组	
	水样编号	含量范围/%	水样编号	年龄范围(a)
①高	3, 8,53	100 (Un)	3, 8	5~6
②中	1,2,5,7,32,33	≥80(M)	1,2,5,7,32,33,53	8~19
③低	31,48,40,49,52	<80 (M/P)	31,48,40,49,52	24~36

5 讨论

为了验证地下水年龄对含水层地下水固有脆弱性的指示是否具有合理性,本次通过水文地质条件和地下水污染数据来分析对比并进行讨论。

5.1 地下水位埋深和渗透系数验证

根据研究区已有资料程度,选取传统固有脆弱性评价方法DRASTIC法[30-31]中的水位埋深、渗透系数两项指标进行验证和讨论。水位埋深影响污染物到达含水层经历的路程和时间,在不考虑其他因素时,通常水位埋深越浅,污染物发生反应的时间越短、衰减的机会越少,地下水就越脆弱。该区地下水位埋深由漏斗区向周边逐渐减小,在西北部普遍小于15 m,其他大部分地区一般大于20 m。水位埋深

超星·期刊

指示的地下水脆弱性趋势为:由山前到扇缘脆弱性呈减弱趋势,其中漏斗区由于埋深较大,脆弱性较低。与地下水年龄指示脆弱性的结论差异在于漏斗区地下水位埋深较大而脆弱性较低。这种差异的解释是:地下水漏斗区形成水动力场的"汇"(图6),周边地下水向漏斗中心补给,运动速率快,从而导致地下水年龄较年轻(约10 a)且具较高脆弱性。若存在面源污染时,漏斗区高脆弱性将表现的尤为显著。

渗透系数影响污染物的入渗速度,在不考虑其他因素时,渗透系数越大,污染物入渗的速度就越快,地下水易受到污染,脆弱性相对越高。该区渗透系数由西北向东南总体呈减小趋势(图6),地下水渗透能力降低,潜在污染物在地下水中运动的速度相对减慢,指示地下水脆弱性程度也沿西北至东南方向总体相应减弱,这与地下水年龄指示的结论吻合较好。

5.2 NO_3^-和Cl^-分布指示证据

受人类活动影响,地下水NO_3^-、Cl^-等含量和分布将发生变化,其分布差异反映出地下水受污染程度的高低,一定程度上反映了地下水脆弱性的强弱。

研究区地下水NO_3^-分布规律是:以石家庄市区偏西部为中心,靠近西部、西南部地区污染程度增高,而靠近北部、东部地区污染程度呈减小趋势,这

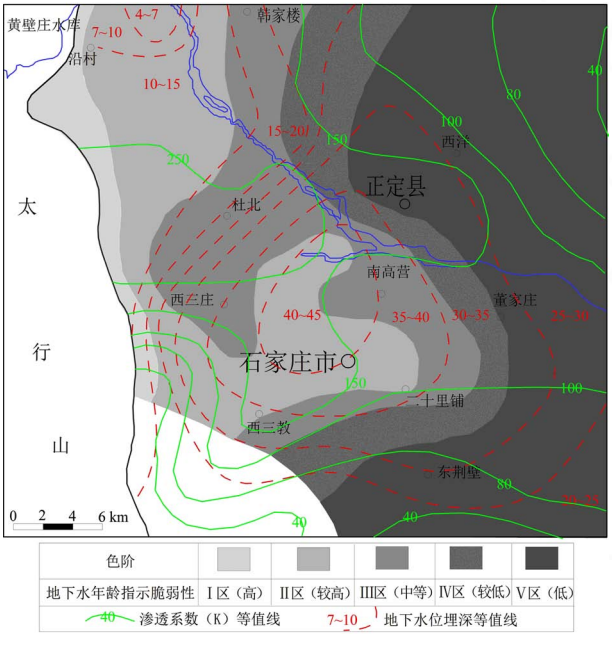

图6 地下水位埋深和渗透系数等值线与地下水年龄指示脆弱性分区对比

Fig.6 Comparison of groundwater depth and permeability coefficient contour with vulnerability partition based on groundwater age

与地下水年龄指示的脆弱性分区具有良好的一致性(图7)。不同点在于:除漏斗区外,NO_3^-污染高值区还分布在石家庄南部-栾城附近,通过分析污染源,推断主要是受历史排污渠(东明渠)的影响,南部样点Cl^-离子浓度偏高也反映了这一解释的合理性。此外,Cl^-离子高浓度样点主要分布在高脆弱区(Ⅰ区)和较高脆弱区(Ⅱ区),也较好地反映出地下水年龄指示脆弱性具有一定合理性(图7)。

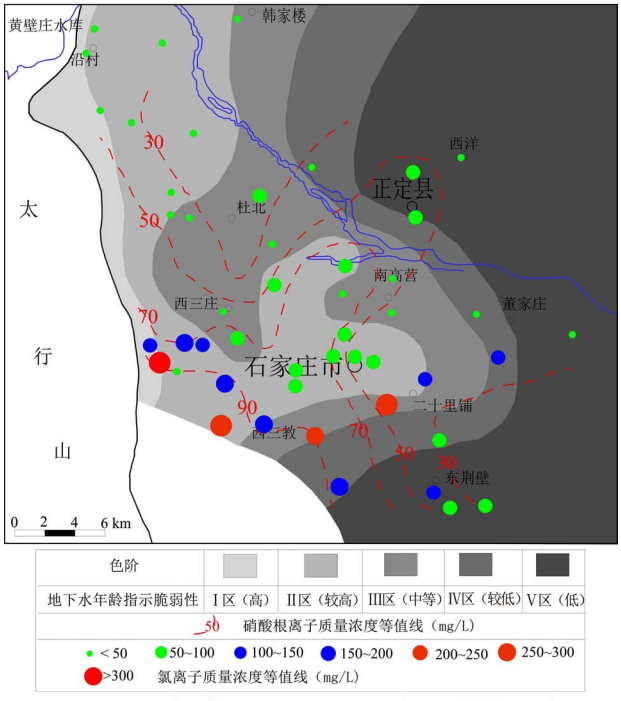

图7 NO_3^-和Cl^-离子质量浓度等值线与地下水年龄指示脆弱性分区对比

Fig.7 Comparison of groundwater NO_3^- and Cl^- content with vulnerability partition based on groundwater age

6 结论

(1)$^3H/^3He$和^3H同位素数据测年结果表明,研究区浅层地下水年龄介于4~36年,均为现代水补给,地下水年龄由山前至平原沿地下水流动的方向逐渐增大,具有较明显的分带性。

(2)通过与现代水含量识别含水层固有脆弱性方法对比,同时选用地下水位埋深、渗透系数两个固有脆弱性影响因素以及NO_3^-、Cl^-离子含量进行验证,证实地下水年龄的分布对含水层固有脆弱性具有较好的指示意义,研究区含水层固有脆弱性由山前到平原呈现降低趋势。

(3)本次收集使用了前人已有研究资料,可能存

超星·期刊

在不同取样时间导致的误差,建议后续研究者在同一周期内采集批量样品开展研究。同时,受资料所限,仅使用了水位埋深、渗透系数等指标进行验证和讨论,后续研究者可采用DRASTIC法或其改进法进行对比研究。

参考文献:

[1] 吴爱民,荆继红,宋博.略论中国水安全问题与地下水的保障作用[J].地质学报,2016,90(10):2939-2947.

[2] 蒋万军,孟利山,柳富田,等.张家口地区地下水资源与环境质量现状及开发利用保护建议[J].华北地质,2022,45(3):44-54.

[3] 苗晋杰,靳继红,杜东,等.首都副中心及重点区域地下水环境质量评价与问题成因[J].地质调查与研究,2020,43(3):224-229.

[4] 王攀,靳孟贵,路东臣,等.永城市浅层地下水污染分布特征及来源识别[J].地质科技通报,2022,41(1):260-268.

[5] 李月兴,杨臣,潘虹,等.地下水脆弱性研究综述[J].黑龙江科学,2013,4(5):80-83.

[6] 解飞,刘景涛,张玉玺,等.基于"层级阶梯评价方法"的地下水质量与污染评价—以铜川市为例[J].地学前缘,2021,(05):24-34.

[7] 江欣悦,李静,郭林,等.豫北平原浅层地下水化学特征与成因机制[J].地质科技通报,2021,40(5):290-300.

[8] 姜桂华.地下水脆弱性研究进展[J].世界地质,2002,21(1):33-38.

[9] 王焰新.地下水污染与防治[M].北京:高等教育出版社,2007.

[10] 李晨,秦大军.关中盆地浅层地下水CFC年龄的计算[J].工程勘察,2009,(9):39-44.

[11] 石旭飞,董维红,李满洲,等.河南平原浅层地下水年龄[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(1):190-197.

[12] 陈宗宇,陈京生,费宇红,等.利用氚估算太行山前地下水更新速率[J].核技术,2006,29(6):426-431.

[13] ANDREW H MANNING, D KIP SOLOMON, SUSAN A THIROS. $^{3}H/^{3}He$ Age Data in Assessing the Susceptibility of Well to Contamination[J]. Ground Water, 2005, 43:353-367.

[14] 卫文.华北平原第四系含水层地下水年龄与补给温度[D].北京:中国地质科学院,2007.

[15] 尚海敏,李国敏,于进庆,等.环境同位素技术在地下水研究中的应用[J].地下水,2008,30(2):18-22.

[16] GELLERMANN R, JORDAN H, HEBERT D, et al. A Concept and Isotope Method for Groundwater Vulnerability Assessment [J]. Isotope praxis, 1990, 12: 561-565.

[17] FERNANDO L V, JAN S, EDUARDO F, et al. Identification of zones of higher aquifer vulnerability by means of stable environmental isotopes[J]. Groundwater Quality: Remediation and Protection (Proceedings of the Prague Conference), IAHS, 1995: 225.

[18] Nelms D L, Georage E, Harlow J. Aquifer Susceptibility in Virginia: Data on Chemical and Isotopic Composition, Recharge Temperature, and Apparent Age of Water from Wells and Springs, 1998-2000 [R]. Open-File Report 03-246, US Department of the Interior, US Geological Survey, 2003.

[19] Moran J E, Leif R, Esser B K, et al. Evidence for Groundwater Contamination Vulnerability in California's Central Valley [J]. California Plant and Soil Conference, USA, 2006.2.

[20] Koh D C, Plummer L N, Solomon D K, et al. Application of environmental tracers to mixing, evolution and nitrate contamination of ground water in Jeju Island, Korea [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327: 258-275.

[21] 张翼龙,陈宗宇,曹文庚,等.DRASTIC与同位素方法在内蒙古呼和浩特市地下水防污性评价中的应用[J].地球学报,2012,33(5):819-825.

[22] MOLSON J W, FRIND E O. On the use of mean groundwater age, life expectancy and capture probability for defining aquifer vulnerability and time-of-travel zones for source water protection [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2012, 127: 76-87.

[23] Edward K.P. Bam, Samuel Bansah. Groundwater chemistry and isotopes reveal vulnerability of granitic aquifer in the White Volta River watershed,West Africa [J]. Applied Geochemistry, 2020, 119: 1-18.

[24] ANDREAS M KREUZER, CHRISTOPH VON ROHDEN, RONNY FRIEDRICH, et al. A record of temperature and monsoon intensity over the past 40 kyr from groundwater in the North China Plain[J].Chemical Geology, 2009,259: 168-180.

[25] 张翠云.氮同位素技术及其在石家庄市地下水硝酸盐污染研究中的应用[D].北京:中国地质大学(北京),2005.

[26] LU YINTAO,TANG CHANGYUAN,CHEN JIANYAO,et al. Spatial characteristics of water quality, stable isotopes and tritium associated with groundwater flow in the Hutuo River alluvial fan plain of the North China Plain[J]. Hydrogeology Journal,2008,16:1003-1015.

[27] KREUZER. A record of temperature and monsoon intensity over the past 40 kyr from groundwater in the North China Plain [J]. Chemical Geology, 2009, 259: 168-180.

[28] MALOSZEWSKI P, ZUBER A. Lumped parameter models for interpretation of environmental tracer data. Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology[R]. IAEA-TECDOC 910, IAEA, Vienna, 9-58, 1996.

[29] HINSBY K, EDMUNDS W M, LOOSI H H, et al. The morden water interface: Recognition, protection, and development—Advance of modern waters in European aquifer systems[J]. The G eology Society,2001,(189):271-288.

[30] 贺新春,邵东国,陈南祥,等.几种评价地下水环境脆弱性方法之比较[J].长江科学院院报,2005,22(3):17-20.

[31] 唐克旺,唐蕴,徐鹏云.地下水脆弱性评价:概念、方法与应用[J].中国水利,2013,19: 57-64.

超星·期刊

Shallow groundwater ages and implication to the intrinsic vulnerability of aquifers in piedmont plain of Taihang mountain

LIU Hongwei[1,2,3], WANG Guoming[1,2*], GAO Mingda[4]

(1.*Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin* 300170, *China;* 2.*North China Center of Geoscience Innovation, China Geological Survey, Tianjin* 300170, *China;* 3.*Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China;* 4.*Xinfeng Branch of Hebei Mulan Paddock State-owned Forest Farm, Chengde Hebei* 068450, *China*)

Abstract: Groundwater resources play an important role in water supply for industry and living, however, with the increasing of human activities, groundwater pollution has occurred in many areas. Therefore, groundwater protection research becomes an imperative basic work. Previous studies showed that groundwater ages can indicate the intrinsic vulnerability of aquifers, which reflected the potential pollution risk of groundwater. Taking the piedmont plain of Taihang mountain as an example, the groundwater ages and their implication to intrinsic vulnerability were studied based on ^{3}H（^{3}H /^{3}He）isotopes. The results showed that the ages of the shallow groundwater in the study area were generally less than 40 years, which increased along the direction of groundwater flow from piedmont to plain, and presented a better zonation feature. Simultaneously, comparing with the method of indicating inherent vulnerability of aquifer by content of modern water in groundwater, it revealed that the distribution of groundwater ages also displayed a good indication. The results showed that inherent vulnerability of the aquifers in the study area showed a decreasing trend from the piedmont to the plain, and was discussed and verified with other indicators and data.

Key words: groundwater age; intrinsic vulnerability; aquifers; indication; piedmont plain of Taihang mountain

Analysis and evaluation of urban geological environment problems: take Liaocheng city, Shandong province as an example

YANG Lizhi[1], WANG Guoming[2,3], HAN Bo[2,3], LI Zhuang[2,3*], CHEN Yao[4]

(1.*Shandong Institute of Geological Survey, Jinan* 250013, *China;* 2.*Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin* 300170, *China;* 3.*North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin* 300170, *China;* 4.*Liaocheng Bureau of Natural Resources and Planning, Liaocheng Shandong* 252001, *China*)

Abstract: Based on the data of basic geology, hydro-engineering-environment geological data and InSAR interpretation results of Liaocheng with different precision, this paper graded the existing environmental geological problems, such as land subsidence, soil salinization, water and soil pollution in central city area of Liaocheng, and analyzed the development characteristics and distribution range of environmental geological problems. The results show that: the land subsidence in the central city of Liaocheng from 2008 to 2018 was relatively uniform, with no obvious settlement funnel center. Since 2016, the land subsidence rate gradually slowed down, and the development degree of land subsidence gradually changed from moderate development to weak development; most of the soil in the study area was in a state of unsalinization, and the soil salinization phenomenon basically disappeared; The groundwater pollution in the suburbs of the study area is very light, and the shallow groundwater pollution in the urban and nearby areas is heavy, which is mainly affected by three nitrogen and semi-volatile organic indicators benzo [a] pyrene; Good grade water (class II, class III), poor grade water (class IV) and extreme poor grade water (class V) accounted for about 0.6%, 53.4% and 46% of the total area, respectively, some water sample nitrate, Cl^{-}, SO_4^{2-}single index to class V or class IV; The liquefiable sand soil was widely distributed in the study area, but there was no damage to the buildings. The results can provide the geological basis and technical support for urban planning, construction and sustainable development of Liaocheng city.

Key words: environmental geological problems; grading evaluation; developmental characteristics; urban geological survey; Liaocheng City