

新疆和田河流域绿洲区地下水质量演化特征

李玲^{1,2}, 邵龙美³, 周金龙⁴, 徐娟^{1,2}

(1. 新疆工程学院 矿业工程与地质学院, 新疆 乌鲁木齐 830023; 2. 新疆地质灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830023; 3. 乌鲁木齐市环境监测中心站, 新疆 乌鲁木齐 830013; 4. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:以新疆和田河流域绿洲区1980、2014和2017年地下水化学检测数据为基础,运用单指标评价法进行地下水质量评价及关键指标识别,并分析该区域地下水质量在时间与空间上的演化特征。结果表明:和田河流域绿洲区潜水质量总体较差,1980年浅层地下水有Ⅱ类水存在,Ⅳ类和Ⅴ类水共占总水样的61.8%;2014年Ⅳ类和Ⅴ类水共占91.1%;2017年Ⅳ类和Ⅴ类水共占72.5%。影响地下水质量的关键指标除TDS、TH、 Cl^- 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 常量组分外,还有 F^- 、Fe、Mn和BaP等微量组分。1980和2017年绿洲区地下水质量在水平方向上的分布规律相似,冲洪积细土平原中上部区域,尤其是出山口河流渗漏影响带的地下水质量较好;冲洪积细土平原尾部地下水质量较差。2014年Ⅴ类水的分布面积最大,Ⅲ类和Ⅳ类水零星分布。垂直方向上,浅层地下水质量普遍劣于中深层地下水。1980-2014年绿洲区地下水质量逐渐下降,2014-2017年地下水质量出现略微好转的趋势。

关键词:绿洲区;地下水质量;演化特征;和田河流域

中图分类号:TV211.1+2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)01-0063-09

Evolution characteristics of groundwater quality in Hotan River Basin oasis, Xinjiang

LI Ling^{1,2}, SHAO Longmei³, ZHOU Jinlong⁴, XU Juan^{1,2}

(1. College of Mining and Geology Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Geohazard Prevention, Urumqi 830023, China; 3. Urumqi Environmental Monitoring Centre, Urumqi 830013, China; 4. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Based on the chemical test data of groundwater in the oasis area of Hotan River Basin, Xinjiang in 1980, 2014 and 2017, the single index evaluation method was used to evaluate the groundwater quality and identify the key influencing indicators. Meanwhile, the spatio-temporal evolution characteristics of groundwater quality in this area was analyzed. The results show that the quality of unconfined groundwater in the oasis area was generally poor. In 1980, 61.8% of groundwater was classified as IV and V, 91.1% of groundwater was classified as IV and V in 2014, class IV and V water accounted for 71.0% in 2017. In addition to the major components (such as TDS, TH, Cl^- , Na^+ and SO_4^{2-}), the key indicators affecting groundwater quality also included trace components such as F^- , Fe, Mn and BaP. In the horizontal direction, the distribution law of groundwater quality in the oasis area in 1980 and 2017 was similar, and the groundwater quality in the middle and upper part of the alluvial-diluvial plain, especially in the area affected by river seepage at the mountain pass was better, whereas that at the end of alluvial-diluvial plain was poor. In 2014, the distribution area of class V water was the largest, whereas class III and IV water were scattered. In the vertical direction, the quality of shallow groundwater was generally inferior to that of middle and deep groundwater. The quality of groundwater in the oasis area decreased gradually from 1980 to

收稿日期:2020-05-01; 修回日期:2020-09-14

基金项目:中央返还两权款资金项目(S15-1-LQ);新疆高校科研计划(XJEDU2019Y061、XJEDU2018Y052);新疆工程学院基金(2018xgy072105)

作者简介:李玲(1982-),女,山东日照人,博士,主要从事水土环境地球化学等研究工作。

通讯作者:周金龙(1964-),男,浙江龙游人,教授,博士生导师,主要从事干旱区地下水资源评价与保护、水土环境地球化学等研究工作。

2014, and then showed a slightly improving trend from 2014 to 2017.

Key words: oasis area; groundwater quality; evolution characteristics; Hotan River Basin

1 研究背景

地下水质量评价是合理开发利用与保护地下水资源的重要前提^[1]。客观的评价结果有助于准确把握地下水质量状况,迅速识别关键指标^[2]。而影响评价结果的客观性与准确性的因素有很多,其中最为关键的是评价方法的选取。对此国内外许多学者做了大量工作,致力于寻找能够全面、综合反映地下水质量状况,降低人为因素影响的评价方法,常见的有单指标评价法^[3]、综合指数法^[4]、模糊综合评判法^[5]、灰色聚类分析法^[6]、人工神经网络模型^[7]、物元可拓模型^[8]和云模型^[9]等。还有学者通过不同方法的综合对比,分析各方法的优缺点及使用范围,并在原方法基础上进行改进^[10-13]。虽然目前评价方法众多,但笔者认为地下水质量具有“木桶效应”,即地下水质量的优劣取决于水中超标最严重的某个或某些成分,这也是单指标评价法的评价原理,故采用单指标评价法进行地下水质量评价更为合理。

地下水作为新疆和田河流域绿洲区重要的饮用水源^[14],其水质状况影响着当地居民健康及工农业生产。关于该地区地下水质量评价的研究引起了许多学者的关注,付永峰等^[15]分别采用模糊综合评判法和 BP 神经网络模型对绿洲区 1999 年地下水质量进行了评价,李玲等^[16]采用单指标评价法对绿洲区 2014 年地下水质量进行了评价,并分析了地下水中“三氮”、氟、重金属元素等的含量特征及其对水质的影响,以上研究为仅通过某次水质检测进行的质量评价,但针对该地区地下水质量随时间的演化特征缺少系统性分析。本文以 1980、2014 和 2017 年水化学检测数据为基础,采用单指标评价法进行地下水质量评价,通过“超Ⅲ类水指标贡献率”识别影响水质的关键指标,在此基础上分析绿洲区地下水质量时空演化特征,以期为该地区地下水资源的合理开发与保护、解决农村饮水安全问题提供一定的科学依据。

2 数据采集与研究方法

2.1 研究区概况

和田河流域绿洲区位于塔里木盆地南缘的冲洪积细土平原上,是和田地区面积最大的绿洲,包括和田县、洛浦县、墨玉县与和田市 4 个县级行政区。由

以喀拉喀什河和玉龙喀什河(以下称“两河”)为中心,次一级河流及灌溉渠道为骨架,构成的密集网状水体廊道,使绿洲区成为流域内重要的人口聚居地和灌溉农业区。流域属暖温带大陆性沙漠气候,常年干旱少雨,光热资源丰富,蒸发强烈,多年平均降水量为 35.6 mm,多年平均蒸发量为 2 159.0 ~ 3 137.0 mm^[17]。

绿洲区水文地质条件简单,地下水类型基本为第四系孔隙潜水。含水系统结构单一,地表覆盖的巨厚第四纪松散堆积物和无成层黏性土有利于地表水转化为地下水,由渗透性极弱的砂质、粉砂质和泥质岩组成的古近纪-新近纪地层,构成了相对隔水的基底^[18]。

绿洲区干旱少雨,大气降水一般不会成为地下水的有效补给。河流、渠系及田间灌溉水的入渗以及山区基岩裂隙水的侧向补给是绿洲区地下水的重要补给来源。强烈的蒸发作用、侧向潜流补给沙漠区和人工开采是该区地下水的重要排泄方式。地下水水动力条件由南向北逐渐变差,大致沿 G315 国道一线为界,以南为冲洪积细土平原的中上部,水力坡度相对较大,约为 1‰~4‰,属强径流区,以北为冲洪积细土平原的尾部,水力坡度小于 1‰,属弱径流区^[18]。

2.2 水质采样点布置

课题组于 2014 年 7 月在绿洲区开展了地下水污染调查工作,共采集地下水样 45 组(其中编号为 H56~H106, H80、H81、H92、H93、H94、H100 的采样点在研究区范围之外),全部为潜水样,控制面积约为 4 138 km²;2017 年 7 月共采集地下水样 75 组(编号 HT1~HT25、L1~L30、M1~M25, HT1、L7、L9、L16、L19 在研究区范围之外),其中 6 组为分层取样,全部为潜水样;在初步分析 2014 年水化学检测数据的基础上,2018 年对 13 个调查井进行补充取样与污染源调查工作,采样点位置见图 1。取样过程中严格按照《区域地下水污染调查评价规范》(DZ/T 0288-2015)规定的方法进行采集与保存。除此之外,本文还收集了中国人民解放军 00929 部队于 1980 年开展的“和田地区区域水文地质普查”工作中 28 个浅钻(编号 QZ1~QZ29, QZ8 在研究区范围之外)和 27 个钻孔(编号 Z4~Z34, Z7、Z8、Z11、Z12 在研究区范围之外)的 55 组水样水化学检测数据,采样点位置见图 1。

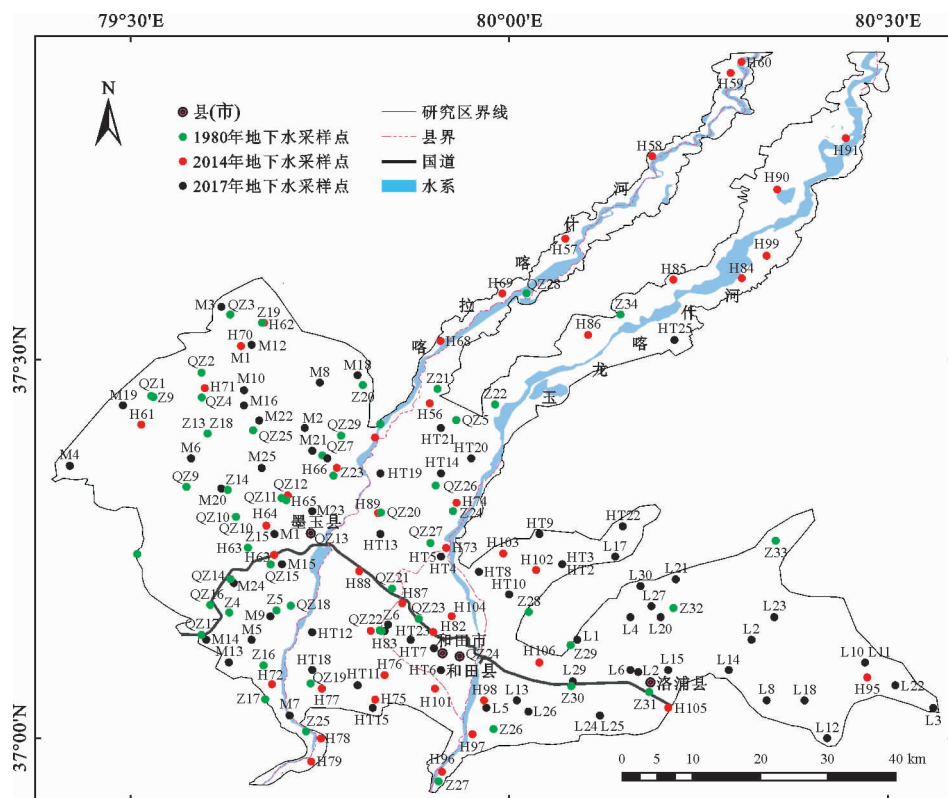


图1 研究区地下水采样点分布图

2.3 研究方法

单指标评价法是最严格的一种评价方法,其原理简单、计算方便,可以清晰地判断出关键指标。该方法的相关规范^[19]中唯一推荐的评价方法,也是我国实施多年且获得普遍认可的一种方法。

单指标评价法是指分别对所选评价指标的实测值与规范^[19]中各类别标准限值进行对比并分类,最终将单个指标评价结果中的最高类别确定为该组地下水质量类别,将该指标确定为影响该组地下水质量的关键指标^[19]。决定地下水质量类别的关键指标很少为单一的,绝大多数水样的关键指标有多个。影响整个研究区地下水质量的关键指标引入“超Ⅲ类水指标贡献率”的概念来定量确定^[20]。“超Ⅲ类水指标贡献率”($C_{\text{单}}$)的定义是某指标超过Ⅲ类水标准值的样品数($N_{\text{单}}$)与所有水质等级为Ⅲ类及以上的样品数($N_{\text{总}}$)之比,数学表达式为 $C_{\text{单}} = N_{\text{单}} / N_{\text{总}} \times 100\%$ ^[21]。本文将“超Ⅲ类水指标贡献率”超过10%的指标确定为影响绿洲区地下水质量的关键指标。

3 结果与分析

3.1 地下水质量状况

3.1.1 1980年地下水质量状况

1980年有28组

地下水水样采自浅钻,全部为潜水,进行混合取样;27组地下水水样采自钻孔,其中有9组水样分上、下两层进行取样,因此共有55组浅层潜水样和9组深层潜水样。采用单指标评价法对1980年和田河流域绿洲区地下水质量进行评价,结果见表1。

由表1可见,1980年55组浅层潜水样中,无Ⅰ类水,只有1个地下水水样的质量类别为Ⅱ类水(占1.8%),其余均为Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅴ类水,分别占总水样的36.4%、32.7%和29.1%,其中Ⅳ类和Ⅴ类水占61.8%,表明1980年绿洲区浅层地下水质量总体较差。

1980年和田河流域绿洲区超Ⅲ类水指标贡献率的统计结果见图2,图2表明“超Ⅲ类水指标贡献率”的大小顺序为 $\text{TDS}(76.6\%) > \text{Cl}^- (68.8\%) > \text{Na}^+ (39.1\%) > \text{TH}(32.8\%) > \text{SO}_4^{2-} (26.6\%) > \text{NH}_4^+ (3.1\%) = \text{NO}_2^- (3.1\%)$,可知1980年影响绿洲区地下水质量的关键指标有 TDS 、 Cl^- 、 Na^+ 、 TH 和 SO_4^{2-} 。

分层取样的水质结果有3种情况(表1):(1)上下层水质类别不一致,下层水质优于上层水质类别,如Z4-1和Z5-1的水质类别为Ⅲ类、Z4-2和Z5-2水质类别为Ⅱ类;(2)上下层水质类别一致,如Z9-1、Z9-2、Z13-1、Z13-2和Z18-1、Z18-2

均为Ⅴ类水;(3)上下层水质类别不一致,下层水质劣于上层水质类别,如 Z15-1 和 Z27-1 为Ⅲ类水、Z15-2 和 Z27-2 为Ⅴ类水,Z25-1 为Ⅳ类水、Z25-2 为Ⅴ类水。总体而言,1980 年和田河流域绿洲区中、深层潜水质量优于浅层潜水,某些钻孔中的水质出现“下咸上淡”的现象,可能是下层含水介质颗粒较细,地下水径流速度很慢,化学成分不断累积

所造成。

3.1.2 2014 年地下水质量状况 2014 年采集的 45 组潜水样为混合取样,调查井深度范围是 6~100 m。根据绿洲区实际情况,以 20 m 井深为界将潜水划分为浅层潜水(井深<20 m)和中深层潜水(井深≥20 m)。2014 年和田河流域绿洲区地下水质量评价结果见表 2。

表 1 1980 年和田河流域绿洲区各组地下水水样质量类别评价结果

编号	关键指标	类别	编号	关键指标	类别
QZ1	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻	Ⅳ	Z6	TDS	Ⅳ
QZ2	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅳ	Z9-1	TDS, Na ⁺	Ⅴ
QZ3	Cl ⁻	Ⅴ	Z9-2	Cl ⁻	Ⅴ
QZ4	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻	Ⅳ	Z10	TDS, Cl ⁻ , NO ₂ ⁻	Ⅲ
QZ5	TDS, TH, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅴ	Z13-1	TDS, TH, Na ⁺ , SO ₄ ²⁻	Ⅴ
QZ6	TDS, Cl ⁻	Ⅳ	Z13-2	TDS, TH, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅴ
QZ7	TDS, TH	Ⅳ	Z14	Cl ⁻	Ⅴ
QZ9	TDS, Na ⁺	Ⅳ	Z15-1	TDS, Cl ⁻ , NH ₄ ⁺	Ⅲ
QZ10	TDS	Ⅲ	Z15-2	Cl ⁻	Ⅴ
QZ11	TDS, Cl ⁻	Ⅳ	Z16	TDS, Cl ⁻	Ⅲ
QZ12	TDS	Ⅲ	Z17	TDS, TH, SO ₄ ²⁻	Ⅴ
QZ13	TDS, Cl ⁻	Ⅳ	Z18-1	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅴ
QZ14	TDS, TH, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅱ	Z18-2	Na ⁺ , Cl ⁻	Ⅴ
QZ15	TDS, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅲ	Z19	Na ⁺ , Cl ⁻	Ⅴ
QZ16	TDS, TH, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅲ	Z20-1	Cl ⁻	Ⅴ
QZ17	TDS, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₂ ⁻	Ⅲ	Z20-2	Cl ⁻	Ⅴ
QZ18	TDS, TH, Cl ⁻	Ⅲ	Z21	Cl ⁻	Ⅴ
QZ19	TDS, TH, Cl ⁻	Ⅲ	Z22	Cl ⁻	Ⅴ
QZ20	TDS, TH, Cl ⁻	Ⅳ	Z23	TDS	Ⅲ
QZ21	TDS, TH, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅳ	Z24	Cl ⁻	Ⅴ
QZ22	TDS, TH, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅳ	Z25-1	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻	Ⅳ
QZ23	TDS, TH, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅳ	Z25-2	Cl ⁻	Ⅴ
QZ24	TDS, TH, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅲ	Z26	TDS	Ⅲ
QZ25	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻	Ⅴ	Z27-1	TDS	Ⅲ
QZ26	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻	Ⅴ	Z27-2	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅴ
QZ27	TDS, TH, Na ⁺	Ⅲ	Z28	TDS, TH	Ⅲ
QZ28	TDS, Na ⁺	Ⅳ	Z29	TDS, TH	Ⅲ
QZ29	TDS, TH, Na ⁺	Ⅲ	Z30	TDS, TH, Na ⁺	Ⅳ
Z4-1	TDS, Cl ⁻	Ⅲ	Z31	Na ⁺	Ⅳ
Z4-2	TDS, TH, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅱ	Z32	Na ⁺	Ⅳ
Z5-1	TDS, NH ₄ ⁺	Ⅲ	Z33	TDS, Na ⁺ , Cl ⁻	Ⅴ
Z5-2	TDS, TH, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ⅱ	Z34	Cl ⁻	Ⅴ

注:标为 Zx-1 和 Zx-2 的表示该组为上、下分层取样,共 9 组。

表 2 2014 年和田河流域绿洲区各组地下水水样质量类别评价结果

类型	编号	关键指标	类别
浅层潜水	H56	TH,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻ ,Fe	V
	H57	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,Mn,As,BAP	IV
	H58	Cl ⁻	IV
	H59	TH,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻ ,BAP	V
	H60	Fe	V
	H61	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻	V
	H62	TDS,TH,pH,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻	V
	H67	Cl ⁻	V
	H68	TH,Cl ⁻	V
	H69	TH,Cl ⁻ ,Fe	V
	H71	Cl ⁻	V
	H72	TH,Fe,As	V
	H73	Mn	V
	H74	Cl ⁻	V
	H75	TDS,TH,SO ₄ ²⁻	V
	H78	TDS,TH,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,Fe	III
	H79	TDS,TH,SO ₄ ²⁻ ,Fe	IV
	H82	F ⁻	V
	H84	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,Fe	V
	H85	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻	V
	H86	TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,Fe	V
	H87	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻	V
	H88	TH,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,Fe,BAP	V
	H89	TH,Fe,Mn,BAP	IV
	H90	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻ ,Fe	V
	H91	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻ ,Fe	V
	H95	F ⁻	V
	H96	Fe	V
	H99	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻	V
	H101	TDS,F ⁻	IV
	H102	TH	V
	H104	TDS,TH,Na ⁺ ,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,F ⁻ ,NO ₃ ⁻	V
	H105	TH,F ⁻ ,Fe,Mn	IV
	H106	pH	V
中层潜水	H63	Cl ⁻	V
	H64	TDS,NO ₂ ⁻	III
	H65	Fe	IV
	H66	TDS,TH,F ⁻	III
	H70	pH,Cl ⁻	V
	H76	TH,SO ₄ ²⁻	V
	H77	TDS,TH,Cl ⁻	IV
	H83	TDS,TH,Cl ⁻ ,SO ₄ ²⁻ ,Fe	IV
	H97	NH ₄ ⁺	IV
	H98	F ⁻	III
	H103	F ⁻	V

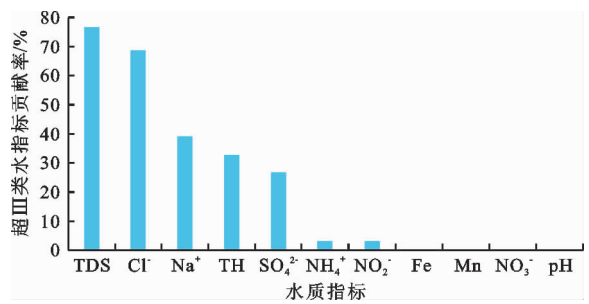


图 2 1980 年和田河流域绿洲区超Ⅲ类水指标贡献率

由表 2 可见,2014 年 45 组潜水样中,无 I 类和 II 类水,Ⅲ类、Ⅳ类和 V 类水分别占总水样的 8.9%、22.2% 和 68.9%,其中Ⅳ类和 V 类水共占 91.1%,表明 2014 年绿洲区地下水质量很差。

2014 年和田河流域绿洲区超Ⅲ类水指标贡献率的统计结果见图 3,图 3 表明“超Ⅲ类水指标贡献率”的大小顺序为 TDS(66.7%)>TH(64.4%)>Cl⁻(60.0%)>Fe(57.8%)>SO₄²⁻(55.6%)>Na⁺(53.3%)>Mn(46.7%)>F⁻(40.0%)>BaP(13.3%)>pH 值(8.9%)=As(8.9%)>NH₄⁺(6.7%)=NO₃⁻(6.7%)>NO₂⁻(4.4%)>Zn(2.2%),可知 2014 年影响绿洲区地下水质量的关键指标较多,有 TDS、TH、Cl⁻、Fe、SO₄²⁻、Na⁺、Mn、F⁻、BaP。

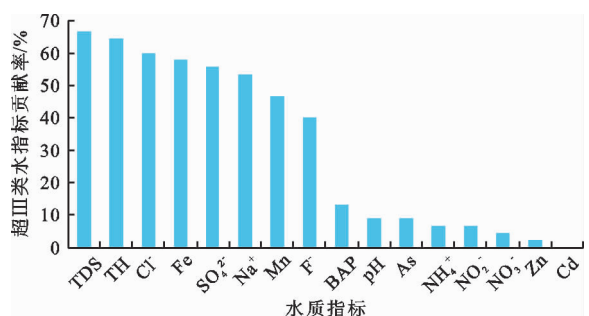


图 3 2014 年和田河流域绿洲区超Ⅲ类水指标贡献率

34 组浅层潜水样中,1 组为Ⅲ类水、6 组为Ⅳ类水、27 组为 V 类水,分别占有浅层水样的 2.9%、17.6% 和 79.5%;TDS、TH、Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻、F⁻ 和 Fe 为影响和田河流域绿洲区浅层潜水质量的关键指标。11 组中深层潜水中,有 3 组Ⅲ类水、有 4 组Ⅳ类水、有 4 组 V 类水,在所有中深层潜水样所占比例分别为 27.2%、36.4%、36.4%;决定中深层潜水质量类别的关键指标主要为 TDS、TH、Cl⁻、F⁻ 等。浅层潜水的水质类别普遍劣于中深层潜水,且只在浅层潜水中才出现了 BaP、Mn、As 和 pH 值超Ⅲ类水标准值的情况。

总体而言,2014 年和田河流域绿洲区浅层潜水质量劣于中、深层潜水质量。

3.1.3 2017 年地下水质量状况 2017 年在和田河流域绿洲区共采集并检测了 75 组潜水样,其中 63

组主要采自民用井,深度一般小于 20 m;6 组水样采自钻孔,分上、下两层进行取样,因此浅层潜水样共有 69 组,中深层潜水样有 6 组。2017 年和田河流域绿洲区地下水质量评价结果见表 3。

表 3 2017 年和田河流域绿洲区各组地下水水样质量类别评价结果

编号	关键指标	类别	编号	关键指标	类别	编号	关键指标	类别
HT2	F⁻	IV	L1	F ⁻	IV	M1	SO ₄ ²⁻	V
HT3	TDS/TH/Cl⁻/SO₄²⁻/F⁻	III	L2	TDS/Na ⁺ /Cl ⁻ /F ⁻ /SO ₄ ²⁻	V	M2	F ⁻	IV
HT4	Cl⁻	V	L3	TDS/F ⁻	III	M3	TDS/TH/Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	V
HT5	Na⁺/Cl⁻	IV	L4	TH/F ⁻	IV	M4	TDS/Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	V
HT6	TDS/TH/F ⁻ /SO ₄ ²⁻	III	L5	TH/SO ₄ ²⁻ /F ⁻ /NH ₄ ⁺	III	M5	TDS/TH/Cl ⁻ /F ⁻ /SO ₄ ²⁻ /NH ₄ ⁺	III
HT7	F ⁻	V	L6	SO ₄ ²⁻ /F ⁻	IV	M6	TDS/TH/Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	V
HT8	F ⁻	IV	L8	TDS/Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	IV	M7	TDS/Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻ /F ⁻	III
HT9	TDS/TH/Cl ⁻ /F ⁻ /SO ₄ ²⁻	III	L10	Na⁺/Cl⁻/SO₄²⁻	V	M8	Cl ⁻	V
HT10	SO ₄ ²⁻ /F ⁻	V	L11	Na⁺/Cl⁻/SO₄²⁻	V	M9	TDS/SO ₄ ²⁻ /F ⁻	III
HT11	TDS/TH/Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	IV	L12	Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	V	M10	Na ⁺ /Cl ⁻ /Cd	V
HT12	TDS/Cl ⁻ /F ⁻	III	L13	F ⁻	III	M11	TDS/Na⁺/Cl⁻/SO₄²⁻	V
HT13	Cl ⁻	V	L14	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	V	M12	TDS/Na⁺/Cl⁻/SO₄²⁻	V
HT14	Cl ⁻	V	L15	F ⁻	V	M13	TH/SO ₄ ²⁻	V
HT15	TDS/Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	V	L17	F ⁻	IV	M14	TDS/TH/Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	III
HT16	TDS/TH/Cl⁻/SO₄²⁻	IV	L18	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	IV	M15	TDS/TH/Cl ⁻ /F ⁻ /SO ₄ ²⁻	III
HT17	TDS/Cl⁻	IV	L20	TH/F ⁻	IV	M16	TDS/Na ⁺ /Cl ⁻	IV
HT18	TDS、Cl ⁻	III	L21	F ⁻	V	M17	F ⁻	IV
HT19	TDS/TH/Cl ⁻	IV	L22	TDS/TH/Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	V	M18	Cl ⁻ /F ⁻	IV
HT20	Cl ⁻	V	L23	TDS/TH	IV	M19	pH/Na ⁺	IV
HT21	Cl ⁻	V	L24	SO₄²⁻	V	M20	TDS/TH/Cl ⁻ /F ⁻ /SO ₄ ²⁻	III
HT22	TDS/Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻ /F ⁻	III	L25	SO₄²⁻	V	M21	TDS/TH/Cl ⁻ /F ⁻	III
HT23	SO ₄ ²⁻	V	L26	TDS/TH/SO ₄ ²⁻	III	M22	TDS/TH/Na ⁺ /Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	V
HT24	TDS/TH/Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	IV	L27	TDS/TH/Cl ⁻ /F ⁻ /NH ₄ ⁺	IV	M23	TDS/TH/Cl ⁻	IV
HT25	TDS/Cl ⁻	III	L28	pH	IV	M24	TDS/TH/Cl ⁻	III
L30	pH	IV	L29	pH	III	M25	F ⁻	IV

注:表中粗体字表示该组为上、下分层取样,共 6 组。

由表 3 可见,2017 年绿洲区 69 组浅层潜水样中,只有 III 类、IV 类和 V 类水,分别占浅层总水样的 27.5%、34.8% 和 37.7%,其中 IV 类和 V 类水共占 72.5%,表明 2017 年绿洲区潜水质量总体较差。

2017 年和田河流域绿洲区超 III 类水指标贡献率的统计结果见图 4,图 4 表明“超 III 类水指标贡献率”的大小顺序为 TDS(44.9%) = Cl⁻(44.9%) > F⁻(39.1%) > SO₄²⁻(37.7%) > Na⁺(36.2%) > TH(31.9%) > pH 值(11.6%) > NH₄⁺(4.3%) > Mn(1.4%) = Cd(1.4%),可以看出影响 2017 年绿洲区浅层潜水质量

的关键指标为 TDS、Cl⁻、F⁻、SO₄²⁻、Na⁺、TH 和 pH 值。

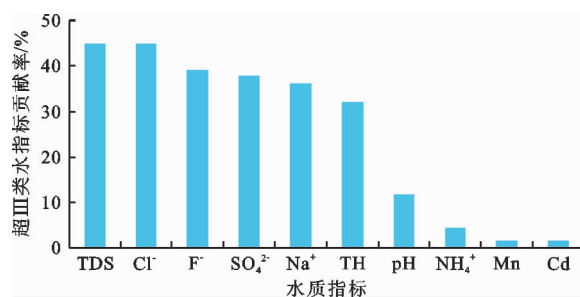


图 4 2017 年和田河流域绿洲区超 III 类水指标贡献率

分层取样的地下水质量存在两种情况(表3): (1)上下层水质类别不一致,下层水质优于上层水质,如 HT2、HT3 的水质类别为Ⅳ、Ⅲ类, HT4、HT5 水质类别为Ⅴ、Ⅳ类; (2)上下层水质类别一致,如 HT16、HT17 水质类别均为Ⅳ类、L10、L11、L24、L25、M11、M12 水质类别均为Ⅴ类。

上述结果表明,2017 年绿洲区中深层潜水质量普遍优于浅层潜水。

3.2 地下水质量演化特征

3.2.1 空间分布特征 根据上述和田河流域绿洲区 1980、2014 和 2017 年地下水质量单指标评价结果分别绘制地下水质量分区图,如图 5 所示。

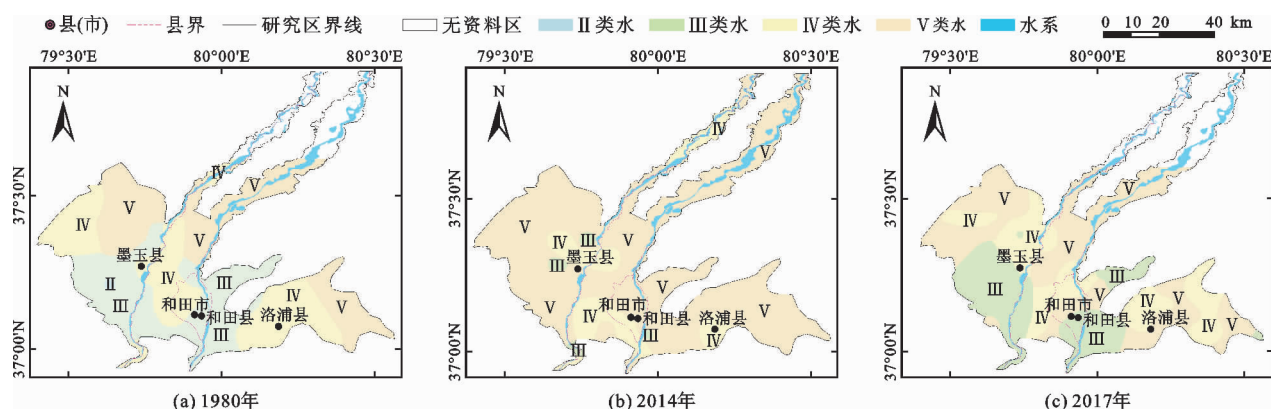


图5 1980、2014 和 2017 年和田河流域绿洲区地下水质量分区图

由图 5(a) 可见,1980 年绿洲区在墨玉县萨依巴格乡附近有Ⅱ类地下水出现,Ⅲ类水、Ⅳ类水、Ⅴ类水分布面积差别不大。Ⅲ类水分布在冲洪积细土平原中上部的两河出山口附近,沿两河向北延伸至冲洪积细土平原的尾部;Ⅳ类水分布在冲洪积细土平原中上部的河间地块和细土平原尾部的部分区域;Ⅴ类水主要分布在冲洪积细土平原的尾部,以及深入沙漠腹地的河谷平原。

由图 5(b) 可见,2014 年绿洲区地下水质量在水平方向上分布的最大特征是Ⅴ类水分布面积最广,Ⅲ类和Ⅳ类水分布面积较小。两河出山口处的和田县拉依喀乡、洛浦县布雅乡以及受河流入渗显著的沿河区域的墨玉县芒来乡、英也尔乡附近地下水为Ⅲ类水。Ⅳ类水主要集中在河间地块,靠近沙漠的河谷平原区墨玉县喀瓦克乡附近也是Ⅳ类水,在此区域的其他水样均为Ⅴ类水。从水文地质及气候条件来看,靠近沙漠的河谷平原区地下水的蒸发浓缩作用强烈,化学成分易于累积,水质较差,但墨玉县喀瓦克乡附近采样点距河流较近,接受河水补给显著,因此水质相对优于其他采样点。

由图 5(c) 可见,2017 年绿洲区地下水质量在水平方向上的分布规律与 1980 年相似。2017 年从绿洲区南部至北部以及从两河出山口处到冲洪积扇边缘,地下水质量略呈过渡性分布。Ⅲ类水主要分布在两河出山口附近和冲洪积细土平原的中上部,包括墨玉县加汗巴格乡、阿克萨依拉乡、萨依巴格乡

和扎瓦镇,和田县吐沙拉乡和吉亚乡,洛浦县布雅乡等,比 1980 年的Ⅲ类水分布面积小;Ⅳ类水较为分散,分布在河间地块和冲积细土平原尾部的局部区域,包括墨玉县英也尔乡、吐外特乡和阔依其乡,和田县巴格其镇、拉斯奎镇和布扎克乡,洛浦县布雅乡和多鲁乡等;Ⅴ类水分布面积最大,主要集中在冲洪积细土平原的尾部以及深入沙漠腹地的河谷平原区,包括墨玉县巴格孜库勒乡、乌尔其乡、雅瓦乡和喀尔赛镇,和田县英阿瓦提乡和伊斯拉木阿瓦提乡,洛浦县拜什托格拉克乡一带。

在绿洲区地形地貌及水文地质条件的控制下,地下水质量的空间分布表现出规律性变化。Ⅲ类水分布区域主要集中在冲洪积细土平原中上部,地下水径流条件良好,埋深较大,水化学作用以溶滤作用为主,蒸发浓缩作用微弱,化学成分不易累积,因此水质较好;此外该区域接受河流的入渗补给显著,与水质较好的河水混合,是其达到Ⅲ类水质的另一原因。Ⅳ类水分布区域位于弱径流区的河间地块与冲洪积细土平原尾部,该区域地势较低,水力坡度小,地下水埋深较浅,水化学作用由溶滤作用向浓缩作用转变,又加之该区域离河流较远,得到河流的入渗补给有限,因此水质稍差。Ⅴ类水分布的区域地势低平,地下水埋藏浅,水力坡度小,地下水流更加缓慢,而相对于冲洪积细土平原的中上部,气候也更加干旱,因此该区域地下水的蒸发浓缩作用最为强烈,化学成分不断累积,致使地下水质量最差。

3.2.2 随时间的演化特征 从评价结果来看,2017 年绿洲区地下水水样中无 II 类水,IV 类水和 V 类水占了 72.5%,2014 年 IV 类水和 V 类水占了 91.1%,1980 年存在 II 类水,IV 类水和 V 类水占了 61.8%。从水平分布特征来看,1980 年 V 类水的分布范围明显小于 2014 和 2017 年,2014 年 V 类水的分布范围最大。从关键指标来看,影响 1980、2014 和 2017 年地下水质量的关键指标均包括 TDS、 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 TH。1980 年对地下水中的氟未进行检测,但 2014 和 2017 年的关键指标有 F^- ,因此结合以往研究资料可推断影响绿洲区地下水质量的关键指标为 TDS、 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、TH 和 F^- 。此外根据 2014 年水质结果(2014 年检测指标较多),影响绿洲区地下水质量的关键指标除以上组分外,还有 Fe、Mn、

BaP 等微量组分。

从 2014 和 2018 年 13 个调查井的地下水质量评价结果来看(表 4),仅有两个调查井的水质发生了变化(采样点 H89 地下水质量由 IV 类变成了 III 类,采样点 H103 地下水质量由 V 类变成了 IV 类),其他调查井的水质无变化,均为 V 类水,关键指标变化也不大。

总体而言,1980–2014 年绿洲区地下水质量随时间呈不断变差的趋势,2014–2017 年水质呈现好转趋势,可能与近年来人们对环境的重视以及环境监管力度的加大、环境保护意识的增强有关。地下水质量随时间发生变化,但空间特征具有相似性,表明绿洲区地下水质量主要受水文地质条件、地形地貌和地层岩性等控制。

表 4 2014 和 2018 年 13 个调查井地下水质量评价结果

编号	2014 年		2018 年		水质变化趋势
	关键指标	类别	关键指标	类别	
H57	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , Mn, As/BAP	IV	TDS, TH, Cl^-	IV	—
H59	TH, Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , BAP	V	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}	V	—
H61	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , F^-	V	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}	V	—
H62	TDS, TH, pH, Cl^- , SO_4^{2-} , F^-	V	Na^+ , Cl^-	V	—
H70	pH, Cl^-	V	Cl^-	V	—
H72	TH, Fe, As	V	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}	V	—
H75	TDS, TH, SO_4^{2-}	V	TDS, TH, Cl^- , SO_4^{2-}	V	—
H87	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , F^-	V	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , F^-	V	—
H88	TH, Cl^- , SO_4^{2-} , Fe, BAP	V	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}	V	—
H89	TH, Fe, Mn, BAP	IV	TH, Cl^-	III	↑
H96	Fe	V	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}	V	—
H103	F^-	V	Cl^- , F^-	IV	↑
H104	TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , NO_3^-	V	TDS, TH, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-	V	—

注:“—”表示地下水质量无变化;“↑”表示地下水质量变好。

4 结 论

(1)通过单指标评价结果可知,和田河流域绿洲区浅层地下水质量总体较差,且影响地下水质量的关键指标不是单一的,除了有 TDS、TH、 Cl^- 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 常量组分外,还有 F^- 、Fe、Mn 和 BaP 等微量组分。

(2)在水平方向上 1980 和 2017 年绿洲区地下水质量的分布规律相似。在水文地质条件、地形地貌和地层岩性等条件控制下,位于强径流区的冲洪积细土平原中上部,尤其是两河出山口区域的地下

水质量较好;位于弱径流区的河间地块及靠近沙漠的冲洪积细土平原尾部区域的地下水质量较差。2014 年的地下水质量空间分布特征为 V 类水的分布面积最大,III 类和 IV 类水零星分布。垂直方向上,1980、2014 和 2017 年均呈现出浅层地下水质量普遍劣于中深层地下水质量的趋势。

(3)对比 1980、2014、2017 年和田河流域绿洲区 III 类及以上地下水样所占比例、关键指标、空间分布特征,以及 2014 和 2018 年 13 个调查井的地下水质量评价结果可知,从 1980 年到 2014 年绿洲区地下水质量逐渐下降,2014 年至 2017 年地下水质量

呈现略微转好趋势。

参考文献:

- [1] 文冬光,林良俊,孙继朝,等. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012,37(2):220-228.
- [2] 白玉娟,殷国栋. 地下水水质评价方法与地下水研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2010,21(3):115-119+123.
- [3] ZHOU Jinlong, DONG Xinguang, LI Guomin, et al. Evaluation of groundwater quality in the Xinjiang Plain area[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2010,4(2):183-186.
- [4] 蓝天杉,苗晋杰,白耀楠,等. 北京通州区潜水水化学特征及形成分析[J]. 节水灌溉, 2018(12):70-76.
- [5] VENKATRAMANAN S, CHUNG S Y, RAJESH R, et al. Comprehensive studies of hydrogeochemical processes and quality status of groundwater with tools of cluster, grouping analysis, and fuzzy set method using GIS platform: A case study of Dalseon in Ulsan City, Korea[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(15):11209-11223.
- [6] DAUGHNEY C J, RAIBER M, MOREAU-FOURNIER M, et al. Use of hierarchical cluster analysis to assess the representativeness of a baseline groundwater quality monitoring network: Comparison of New Zealand's national and regional groundwater monitoring programs[J]. Hydrogeology Journal, 2012,20(1):185-200.
- [7] 李松青,王心义,姬红英,等. 基于遗传算法-BP神经网络法的深埋地下水水质评价[J]. 水电能源科学, 2019,37(1):49-52+16.
- [8] 虞未江,贾超,狄胜同,等. 基于综合权重和改进物元可拓评价模型的地下水水质评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019,49(2):539-547.
- [9] 高玉琴,赖丽娟,姚敏,等. 基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(5):1-7.
- [10] 雷正国,陶月赞. 地下水水源地水质评价方法探讨[J]. 节水灌溉, 2019(8):80-83+89.
- [11] 柴蕴栩,肖长来,梁秀娟,等. 改进 AHP 法灰色关联和模糊综合评价在地下水水质评价中的适用性[J]. 水利水电技术, 2019,50(4):146-152.
- [12] 乔雨,梁秀娟,王宇博,等. 改进的模糊数学法在地下水水质评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015,33(6):27-30.
- [13] 马骁,张永祥,王昊. 改进的尼梅罗污染指数法在地下水水质评价中的应用[J]. 环境工程, 2017,35(3):158-162.
- [14] 刘晓明,景荣,韩明明. 2014 年新疆和田地区农村饮用水水质监测结果分析[J]. 应用预防医学, 2015,21(3):194-195.
- [15] 付永锋,张建,罗光明,等. 基于改进 BP 神经网络的地下水水质评价——以新疆和田地区为例[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004,32(11):129-132.
- [16] 李玲,周金龙,齐万秋,等. 新疆和田河流域绿洲区地下水质量现状与分析[J]. 新疆农业大学学报, 2017,40(3):223-228.
- [17] 刘敏. 和田绿洲地下水时空分布规律及其生态环境效应研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.
- [18] 李玲,周金龙,齐万秋,等. 和田河流域绿洲区地下水中氟的分布特征及形成过程[J]. 干旱区资源与环境, 2019,33(1):112-118.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准:GB/T 14848-2017[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2017.
- [20] 付昌昌,李向全,张岩,等. 盐城滨海平原地下水质量现状及健康风险评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(5):54-60.
- [21] 田夏,费宇红,李亚松,等. 南襄盆地浅层地下水质量影响因子解析[J]. 南水北调与水利科技, 2017,15(6):132-136.

(上接第 62 页)

- [17] 韩有松,王少青,孟广兰. 青岛港湾海岸区第四纪地下卤水生存环境与富集条件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997,17(2):93-102.
- [18] CARTWRIGHT I, WEAVER T R, FIFIELD L K. Cl/Br ratios and environmental isotopes as indicators of recharge variability and groundwater flow: An example from the southeast Murray Basin, Australia[J]. Chemical Geology, 2006, 231(1-2):38-56.
- [19] 沈照理,朱宛华,钟佐桑. 水文地球化学基础(第二版)[M]. 北京:地质出版社,1999.
- [20] 鲍俊林. 明清江苏沿海盐作地理与人地关系变迁[D]. 上海:复旦大学,2014.
- [21] ZABALA M E, MANZANO M, VIVES L. The origin of groundwater composition in the Pampeano Aquifer underlying the Del Azul Creek basin, Argentina[J]. Science of the Total Environment, 2015, 518-519:168-188.