

黑河流域地下水循环演化规律研究

张光辉 刘少玉 张翠云 陈宗宇 聂振龙 申建梅 王金哲 王 昭

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要:大量野外调查研究表明,气候变化和人类活动对黑河流域地下水循环和更新演变具有重要影响;平原区浅层地下水主要是现代水补给,35%来自祁连山区基岩裂隙水通过地表径流转化补给,其他是降水和冰雪融水在山前戈壁带入渗补给,具有较强的更新能力;深层承压水主要形成于地质历史时期区域性补给,与现代水循环有联系;中游区人类活动是造成下游区地下水补给能力减弱、地下水水位持续下降和生态环境退化的重要因素。因此强化中游区人类活动的科学调控,是实现黑河流域地下水可持续利用和下游区生态环境有效保护的关键。

关键词:黑河流域;地下水循环演化;中游区人类活动;科学调控;可持续发展

中图分类号:P641.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2004)03-0289-05

黑河流域下游区是中国北方沙尘暴的主要物源区之一,其生态环境恶化与该流域地下水循环条件劣变密切相关,是近 50 年以来人类活动强度不断加大的结果。实现下游区生态环境良性发展,前提条件是地下水可持续利用,关键是按照水循环自然规律规范人类用水行为。因此研究黑河流域地下水循环演化规律,具有重要意义。

本文根据大量的野外环境同位素采样分析和前人的有关研究成果,针对研究区水循环系统功能的分带性,探讨了地下水与自然条件、社会经济和生态环境之间的资源-环境链关系,阐明了制约地下水可持续利用和导致下游区生态环境劣变的机制,提出了黑河流域人与自然之间协调发展模式及对策。

范锡朋等^①对河西走廊地区地下水分布规律和合理开发利用做过深入的研究,是后续有关研究的重要基础。近年来,程国栋等^②侧重陆地水文过程和生态环境保护问题,开展了“河西走廊黑河流域山区水资源变化和山前水资源转化监测研究”等,提出了全球变化和人类活动对陆地水资源及生态环境影响变化规律。武选民^③采用数值模拟研究方法,研究了额济纳盆地地下水利用与生态环境保护问题,建立了下游区地下水系统结构和有关的新认识。但是,从上、中、下游整

个流域水循环系统出发,系统地采集流域水循环系统环境同位素信息,并建立相应同位素动态网络站监测,深入研究流域系统不同区带的地下水循环、补给和更新能力演化规律,除了本项目之外,尚未见到相关研究成果。

1 自然与社会背景

1.1 自然概况

黑河是中国第二大内陆河,发源于祁连山北麓,干流全长 821 km。黑河流域南以祁连山为界,北与蒙古人民共和国接壤,东西分别与石羊河和疏勒河流域相邻,流域范围东经 98°~102°,北纬 37°50'~42°40'之间,总面积 14.29 km²。其中 60%是戈壁、丘陵山区,平原面积约 5 万 km²。

黑河流域平原区地表水和地下水的 80%~90%来自祁连山区出山径流补给。区内流量大于 1000 万 m³/a 的出山河流 26 条,多年平均径流量 35.74 亿 m³/a,小河流 72 条,其总径流量 2.04 亿 m³/a。随着水资源开发利用程度的不断加大,部分支流逐步与干流失去地表水力联系,形成东、中、西 3 个独立的子水系。其中西部水系包括讨赖河、洪水河等,归宿于金塔盆地;中部水系包括马营河、丰乐河等,归宿于高台盐池—花海子盆地;东部水系包括黑河干流、梨园河及 20 多条沿山小支流。目前进入平原区的天然水资源量约为 28.08 亿 m³/a,

收稿日期:2003-04-25;改回日期:2004-03-15

基金项目:国土资源部重点基础研究项目(200010301)资助。

作者简介:张光辉,男,1959 年生,博士,研究员,博士生导师,长期从事区域水循环演化规律和生态地质环境问题研究;

E-mail: Huanjing@heinfo.net。

①范锡朋,敖淑仙,金玉王,等.甘肃省河西走廊地下水分布规律与合理开发利用研究.甘肃省地质矿产局地质科学研究所,1983.

②程国栋,康尔泗,仵彦卿,等.河西走廊黑河流域山区水资源变化和山前水资源转化监测研究.中国科学院寒区环境与工程研究所,2000.

其中黑河干流 15.80 亿 $\text{m}^3/\text{a}^{[1]}$ 。

黑河流域总用水量 31.46 亿 m^3/a , 其中上游区 0.41 亿 m^3/a 、中游区 25.98 亿 m^3/a 、下游区 5.08 亿 m^3/a , 分别占总用水量的 1.3%、82.6%和 16.1%。

1.2 水循环系统功能分带特征

黑河流域自祁连山区至额济纳盆地, 由于地势由高至低, 水资源自产能力随之减弱, 蒸发潜力逐渐增大, 地下水补给与蕴藏条件趋差, 以至造成水的资源、环境、生态和社会经济功能具有明显的区位分带性。

在黑河流域水循环系统中, 上游为祁连山区、中游是南部盆地和下游为北部盆地。南部盆地包括民乐—大马营盆地、张掖盆地、酒泉东盆地和酒泉西盆地; 下游区的南部是花海子—金塔盆地, 北部是额济纳盆地。

黑河出山口莺落峡以上为上游, 河道长 303 km, 海拔高程为 1700~5564 m, 年降水量为 300~600 mm, 平均 350 mm, 冰川储量 136 亿 m^3 , 每年融水量约 4 亿 m^3 , 是黑河流域的主要产流区和水资源涵养源区。该区人口约 5.98 万人, 耕地 7.69 万亩, 国内生产总值 3.53 亿元, 分别占流域总量的 4.5%、1.9%和 5.6%。

莺落峡至正义峡为中游, 河道长 185 km, 海拔高程 1352~1700 m, 降水量 50~200 mm。出山口地表径流水量的 70%~80%在山前平原戈壁带入补给地下水, 然后在溢出带通过泉排泄方式把入渗水量的 60%~70%转化为地表水。该区人口约 121.20 万人, 耕地 390.87 万亩, 国内生产总值 55.98 亿元, 分别占流域总量的 90.6%、94.5%和 88.7%。中游区分布着广阔的人工绿洲和部分盐碱化土地, 肩负着流域 90%人口和社会经济发展的使命, 是黑河流域水资源主要耗水区和调控关键区, 同时还承担保障下游区生活、生态与生产用水需求的责任。

正义峡以北为下游, 河道长 333 km, 海拔高程为 912~1249 m, 除河流沿岸和居延三角洲外, 大部分为荒漠戈壁, 多年均降水量 37 mm, 最小年份仅 17 mm, 气候异常干燥, 风沙灾害频发, 是目前黑河流域严重缺水区和生态环境脆弱区, 也是中国北方沙尘暴的主要物源区之一。该区的居延三角洲地带绿洲, 既是阻挡风沙侵袭、保护生态的天然屏障, 也是当地人民生息繁衍、国防科研和边防建设的重要依托。该区人口约 6.63 万人, 耕地 14.37 万亩, 国内生产总值 3.61 亿元, 分别占流域总量的 4.9%、3.5%和 5.7%。

黑河流域通过黑河干流和北大河等河流, 串联祁连山区、南部张掖盆地和酒泉盆地、中部花海子金塔盆地以及北部额济纳盆地, 形成了统一的黑河流域“河流—地下水”水循环系统, 山区冰雪融水、基岩裂隙水和降水为主要补给源, 经

由河水输运, 沿途地表水与地下水之间频繁转化, 最终归宿额济纳盆地的居延海。在黑河流域的中、下游平原区, 地下水补给和更新依赖于上游山区地表径流出山水量, 下游区又受控于中游区耗水状况, 任何一个盆地或子系统发生变化必然导致其下游另一个子系统响应而发生资源及环境变化^[2]。

2 地下水循环演化特征

古地理、古水文和现代水文动态资料表明, 近 3000 多年以来黑河流域区域气候持续干旱是生态环境劣变的重要因素, 近几十年的人类活动加剧了生态环境劣变过程。在补给源区(山区), 降水量变化对流域水资源总量变化的影响约占 91%的权重, 气温变化的影响仅约占 9%的权重。降水量变化 1%, 导致径流量增减 1.25%; 温度变化 1℃, 导致径流量增减 3.28%~3.9%。

2.1 千年、百年尺度流域水文条件变化

晚全新世以来, 区域气候持续干旱, 致使黑河流域的湿地大面积萎缩, 草地植被迅速退化和土地沙漠化。有文献记载, 大禹时期额济纳盆地的居延海是西北最大的湖泊。早期居延海湖面曾达到 2600 km^2 , 至秦汉时期, 其湖面仍有 726 km^2 。

近 500 年来, 祁连山区气温升高约 1~1.2℃, 冰川面积减少 33%~46%, 冰川储量减少 31%~51%, 降水量减少 50~80 mm, 冰川融水减少 35%~46%, 陆面蒸发约增加 7%。相对于 1428—1532 年、1622—1740 年和 1797—1865 年百年尺度冷期, 黑河流域内现状总水资源量可能至少减少 20%, 河川径流量减少 14.6%, 地下水补给量减少 4.38~7.61 亿 m^3/a , 其中降水、冰川融水比率分别减少 1.2%和 2.0%, 山区地下水(基流)补给比率增加 3.2%。

2.2 近 50 年地下水循环条件变化

进入 20 世纪后期, 黑河流域水循环状况每况愈下。例如 1958 年西居延海水域面积 267 km^2 , 1961 年秋干涸; 1958 年东居延海的水域面积 35.5 km^2 , 自 1962 年以来先后干涸 5 次, 1992 年彻底干涸。额济纳原有 6 大湖泊, 从 20 世纪 80 年代末至 90 年代初相继全部干涸。50 年前额济纳绿洲面积尚存 3.2 万 km^2 , 而如今仅有 0.332 万 km^2 ; 河湖岸带的胡杨林已经从过去的 5.0 万 ha 减少到现今的 2.26 万 ha; 柽柳林由 15 万 ha 减少到 10 万 ha; 草本植物曾有 130 多种, 目前只存 30 多种; 野生动物原有 180 多种, 现在基本绝迹^[2]。

研究表明, 黑河流域平原区总水资源量和地下水的补给, 与山区祁连山降水关联度为 0.97、气温关联度为 0.80, 与平原区张掖站降水关联度为 0.43、气温关联度 0.60。

自 1944 年以来, 黑河流域水文过程具有明显的阶段性(图 1), 平原地下水补给与更新也具有相类似的丰、枯周期性

① 王宏昌. 甘肃省能对中国生态环境作重大贡献. 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所. 2002, 1-2.

② 程国栋, 康尔泗, 仵彦卿, 等. 河西走廊黑河流域山区水资源变化和山前水资源转化监测研究. 中国科学院寒区环境与工程研究所, 2000.

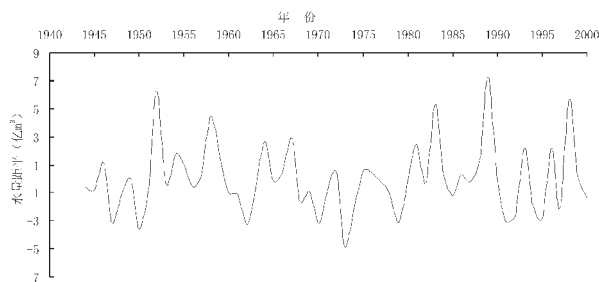


图 1 黑河干流出口水量距平及变化趋势线

Fig. 1 Runoff variation range and trend of the main stream of the Heihe River

变化特征^①。在枯水年,冰雪融水对地表径流补给减少 10.9%,地表径流量减少 25.4%,地下水补给减少 20.5%;在丰水年,冰雪融水补给增加 13.6%,地表径流量增加 34.6%,地下水补给增加 27.8%。

但是,由于山前水库拦蓄和渠道引用,造成黑河流域平原区地下水补给量不断减少(图 2—a),开采量不断增加,地下水位持续下降,泉流量和补给额济纳盆地的水量也不断减少(图 2—b、2—c)。中游区地下水补给量从 20 世纪 50 年代的 36.5 亿 m³/a, 降到 60 年代的 32.9 亿 m³/a、70 年代的 28.8 亿 m³/a 及 90 年代 26.6 亿 m³/a。泉流量从 20 世纪 60 年代的 22.6 亿 m³/a, 到 70 年代的 16.1 亿 m³/a 及 90 年代末的 14.22 亿 m³/a。

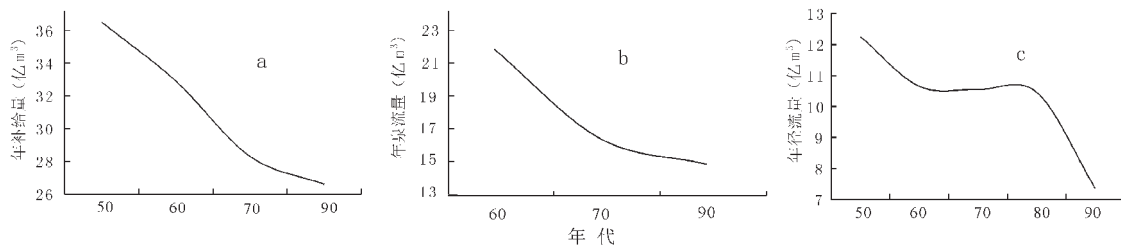


图 2 黑河中游地区地下水年补给量(a)、年泉水量(b)和正义峡年径流量(c)变化过程

Fig. 2 Evolution of annual groundwater recharge (a), annual spring water recharge (b) and annual Zhengyi Gorge runoff (c) in the middle reaches of the Heihe River

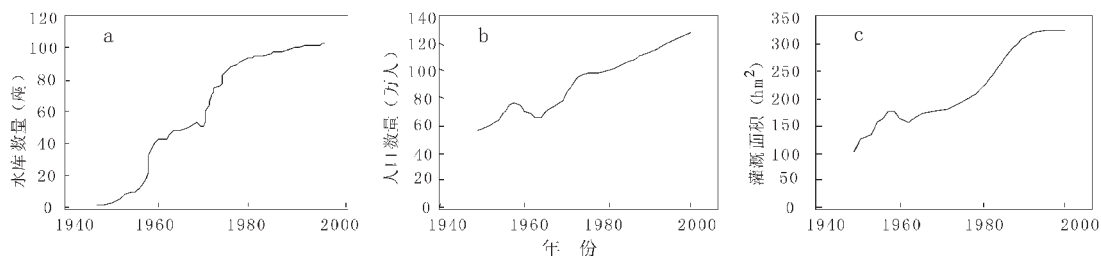


图 3 近 50 年以来干扰黑河流域水循环变异的关键因素演化过程

a—水库数量变化; b—人口数量变化; c—灌溉面积变化

Fig. 3 Evolutionary process of the key factor influencing the water circulation variation of the Heihe River drainage area in the past 50 years

a—Variation in reservoir number; b—Variation in population; c—Variation in irrigation area

3 人类活动影响

黑河流域开发历史悠久,自汉代就已经进入了农业开发和农牧交错发展时期,汉、唐、西夏年间移民屯田,唐代在张掖南部修建了盈科、大满、小满、大官、加官等 5 渠,清代开始开发高台、民乐、山丹等地灌区。新中国成立以来,尤其是 20 世纪 60 年代中期以来,黑河流域进行了较大规模的水利工程建设,先后建成百余座水库(图 3—a),山前大规模建库拦蓄山区地表径流水资源,同时中游区水资源开发利用程度步伐加快。随着人口的增加(图 3—b)、农业灌区面积逐年扩大(图 3—c),以致流入下游区水量逐年减少,河湖干涸,地下水位持续下降,额济纳生态环境急剧恶化,千年不死的胡杨林已经大片枯死,草场退化和沙尘暴肆虐等问题进一步加剧^②。

研究表明,人口增长、政策驱动、旱情影响和水利工程建设是地下水循环系统演化的重要因素。从图 4 可见,20 世纪 50 年代黑河干流水循环仍然处于自然水文过程状态;至 60~70 年代,开始显现人类活动干扰迹象;80 年代以来,转化为人为干扰径流为主状态(图 4),以致中游地下水位持续下降和下游居延海一度全部干涸。

利用指数加权法估算结果,20 世纪 50 年代人类活动对水循环影响的强度为 19%,60~70 年代为 28%,80~90 年代为 53%。在区域分布上,中游区人类活动影响强度最大,为 85%,

①程国栋,康尔泗,仵彦卿,等.河西走廊黑河流域山区水资源变化和山前水资源转化监测研究.中国科学院寒区环境与工程研究所,2000.

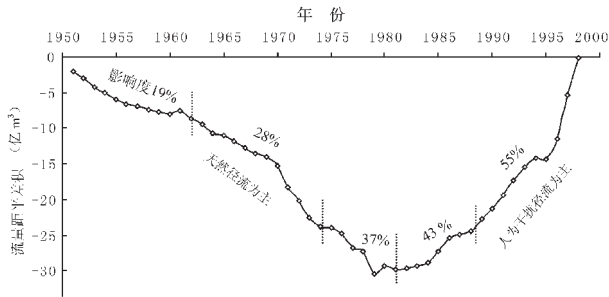


图4 近50年以来黑河干流上、下游间径流量双累积曲线

Fig. 4 Double cumulative curves of runoff between the upper reaches and lower reaches of the main stream of the Heihe River in the past 50 years

上游和下游分别为1%和14%。当人类活动对水循环影响强度超过37%时,这一时期或这一地区的陆地水文过程出现人为干扰径流为主的特征。由此可见,20世纪80、90年代在山前大规模拦截和引用山区来水,是黑河干流水循环过程变异的主要原因;中游区地下水开采量不断增加,加剧了中、下游水循环的劣变过程。

4 地下水形成与循环演化模式

黑河流域的多年平均出山径流量(地下水补给源水量)为37.8亿 m^3/a ,其中山区降水、地下水和冰雪融水分别约占55%、35%和10%,存在年际和年内周期性变化,丰、枯水年份的水量相差2~3倍。

自祁连山源区至额济纳盆地的水循环过程中,出山前地表径流和地下潜流的70%~80%在山前砾石戈壁带渗漏补给地下水,至山前平原地下水溢出带,地下水以泉水形式流出地下,水量可达12.03亿 m^3/a (1999年),占地下水排泄总量的73%。在中游山前平原,地下水系统每年获取的补给量为26.95亿 m^3 。至细土平原带,渠系、田间灌溉水补给占总入渗补给量的12.3%,降水凝结水补给仅占2.5%。至下游额济纳盆地,在正常情况下,地下水系统可获取补给量6.27亿 m^3/a ,其中河水入渗补给占64.3%。

水化学和同位素资料表明,黑河流域地下水补给主要来源于湿冷环境(图5),蒸发影响较小,属于山区降水、冰雪融水和基岩裂隙水补给。山前戈壁潜水和中游潜水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值与山区河水的相近,接近于当地降水值。氟数据证明山前浅层地下水形成于近40年,为1963年以来的山区降水或冰雪融水补给,交替更新快。南部盆地承压地下水,是在比较寒冷气候条件下形成的或来自于更高的补给区,属于比较古老的水,但是在一定程度上参与现代水循环,交替更新比较慢。下游的潜水与中下游地表水同位素特征相似,主要是现代河水和灌溉回归水补给,蒸发作用特征明显。下游区深层承压水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值很低,而且随水流方向逐渐减小,基

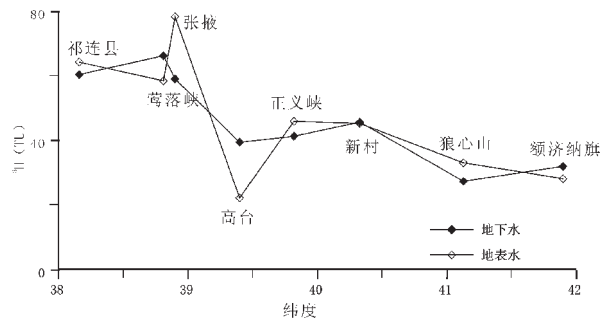


图5 祁连山区至下游区地下水与河水氚值变化特征

Fig. 5 Variation in tritium content of groundwater and river water from the upper reaches (Qilian Mountains) to lower reaches of the Heihe River

本不含氚,其 ^{14}C 年龄为距今5000~14000年,受现代水影响较弱。

在自然条件下,黑河流域地下水补给主要有3种模式:(1)山前平原浅层地下水,为近40年来降水和地表水直接入渗补给,在补给过程中存在蒸发影响;(2)中、下游地区的潜水,以洪水期河流侧渗补给为主,多发生在强降水季节;(3)深层承压地下水,形成于地质历史时期的区域性补给,它们尚未被现代的水循环所严重干扰。

5 结论及建议

通过上述研究,取得如下认识:

(1)黑河流域浅层地下水循环、补给和更新演化过程,主要受区域气候变化影响,具有周期性变化规律,依赖祁连山区现代水循环补给,其中山区基岩裂隙水通过地表径流补给平原区地下水的比重至少占35%。

黑河流域中、下游区的地下水补给主要存在3种模式,其中山前平原降水和地表水直接入渗补给是地下水更新的重要模式;中游的中下区带和流域的下游地区,洪水期季节性河流侧渗补给,是维持绿洲良性发展的主要模式;深层承压地下水,形成于地质历史时期的区域性补给,但是与现代水循环有联系。

(2)黑河流域深层承压地下水,主要形成于距今8000~6000年、3000~2000年期间的多雨温暖期,更新能力与其循环条件有关。基底坡度较大、岩土颗粒较粗和排泄较好的区带,地下水年龄较新,一般小于距今6000年,主要分布在各盆地的上游地带;反之,地下水年龄较老,一般在距今12000~14000年之间,主要分布在额济纳盆地。

(3)中游区人类活动是造成下游区地下水补给能力减弱、地下水位持续下降和生态环境退化的重要因素。

根据黑河流域地下水循环演化的自然规律,实现其可持续利用和有效支撑下游区生态环境良性发展,关键是规范中游区人类用水行,使其符合研究区流域水循环规律。因此,建议:

(1)正确处理兴修水利工程与地下水涵养的关系。祁连山区来水是主要补给源,只有科学利用自祁连山区至额济纳盆地沿途地表水与地下水之间频繁转化规律,充分涵养和合理调控地下水位埋深,才能更有效地减少无效蒸发而高效利用地下水资源,以及保护生态环境和减少沙尘灾害。

(2)面对黑河流域水资源时空极不均衡和总量明显不足的现实,需要着眼于整个黑河流域生活、生态和生产可持续发展的总目标,强化生态需水优先的可持续发展理念,充分发挥地下水调节作用和保障作用。

参考文献(References):

[1] 武选民. 西北黑河额济纳盆地地下水利用与生态环境保护研究(博士学位论文),中国地质大学,2000.

Wu Xuanmin. Groundwater exploitation and ecological environment protection in Ejina Basin of Heihe river watershed North-Weatern China[D]. China University of Geosciences,2000.

[2] 刘少玉,卢耀如,程旭学.黑河中下游盆地地下水系统与水资源开发的资源环境效应[J].地理学与国土研究,2002,18(4):90~96.

Liu Shaoyu, Lu Yaoru, Cheng Xuxue. Groundwater system and water resources environment effect induced by water resources development in the middle and lower reaches of the Heihe river [J]. Geography and Territorial Research, 2002,18(4):90~96.

[3] 张光辉,石迎新,聂振龙,等.黑河流域生态环境的脆弱性及其对地下水的依赖性[J].安全与环境学报,2002,2(3):31~33.

Zhang Guanghui, Shi Yingxin, Nie Zhenlong. A study of the ecological fragility of Heihe River Basin [J].Journal of Safety and Environment, 2002,2(3):31~33.

Evolution of groundwater circulation in the Heihe River drainage area

ZHANG Guang-hui, LIU Shao-yu, ZHANG Cui-yun, CHEN Zong-yu, NIE Zhen-long, SHEN Jian-mei, WANG Jin-zhe, WANG Zhao
(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: Field investigations and studies indicate that climatic variation and human activities have important impacts on groundwater circulation and regeneration-evolution in the Heihe River drainage area of the northwest endorheic drainage region. Shallow groundwater in the plain is mainly recharged by modern water. 35% of it is recharged by surface runoff transformed from bedrock fissure water of the Qilian Mountains and the rest is recharged by infiltration of precipitation and melt water in the piedmont Gobi belt, both of which have a strong regeneration ability. Confined groundwater mainly originates by recharge of regional meteoric water and river water in the geological history, which has relation with modern water circulation. The influence of human activities in the middle reaches of the river is an important factor responsible for the weakening of the groundwater recharge ability, sustained lowering of groundwater level and eco-environmental degradation in the lower reaches. Therefore, the scientific regulation of the human activities in the middle reaches is the key to realizing sustainable utilization of groundwater resources in the Heihe River drainage area and effective protection of the ecological environment in the lower reaches.

Key words: Heihe River drainage area; evolution of groundwater circulation; human activity in the middle reaches; scientific regulation; sustainable development