

京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素

赵玉峰^{1,2}, 罗专溪², 于亚军¹, 陈迎辉³, 张树刚⁴, 张清华²

(1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000; 2. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 3. 河北省地矿局第三地质大队, 张家口 075000; 4. 河北省地矿局国土资源勘查中心, 石家庄 050081)

摘要: 京津冀西北地区是北京、天津重要的水源涵养区和生态屏障,也是“京津冀协同发展”战略重要的支撑区域。为揭示京津冀西北地区地下水位时空演变规律及其驱动因素,以张家口地区为研究区域,选取1981—2015年56个地下水位观测井连续观测数据、水文地质相关资料、气象数据、地下水资源开采数据和社会经济数据,对研究区内坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地四个地貌单元地下水位时空演变规律和驱动因素进行分析。结果表明:张家口地区四个地貌单元及下辖各区县地下水位呈整体下降趋势,且下降速率逐步加快。35年间坝上高原水位降幅3.59 m<蔚阳盆地水位降幅3.6 m<涿怀盆地水位降幅7.17 m<柴宣盆地水位降幅20.41 m。张家口地区四个地貌单元地下水位动态变化与降雨量、蒸发量、气温等自然因素相关性较差,但与第一产业产值、常用耕地面积、有效灌溉面积、粮食总产量、蔬菜总产量、猪牛羊总产量、第二产业产值、第三产业产值和年末总人口等社会经济因素存在显著的相关性。在主成分分析中四个地貌单元前两个主成分的累计方差贡献率均>80%,其中第一个主成分主要为蔬菜总产量、猪牛羊总产量、年末总人口和第一、第二、第三产业产值等社会经济因素,不同地貌单元均可解释66%以上,表明社会经济因素是造成张家口地区地下水位持续下降的主要驱动因素。研究成果可为该地区未来社会经济的可持续发展和区域水资源的合理利用、调配以及京津冀西北地区水源涵养和生态功能保持提供理论依据。

关键词: 地下水位;驱动因素;主成分分析;水资源;张家口

水资源是人类生存和发展最重要的自然资源^[1]。地下水作为水资源的一部分,是理想的工农业和生活用水水源,尤其在在我国半干旱、干旱的华北、西北地区,地下水往往是最主要的、甚至是唯一的水源^[2-4]。地下水超采不仅会造成地面沉降、地下水漏斗、土地盐碱化和沙漠化、地表径流减少等一系列生态环境问题^[5-8],同时会造成水能耗和开采成本增加,为生态保护和区域可持续发展埋下隐患。因此,开展地下水位演变及其驱动因素的研究,对于区域地下水的科学管理与持续利用具有重要的科学价值和实际意义,已经引起国内外学者的广泛关注^[9-16]。

Sattari等^[17]对伊朗西北部的Ardebil平原地下水位研究中发现降水量的减少、长期干旱和过度开采地下水灌溉农田是导致地下水位下降的主要原因。Ojeda Olivares等^[18]对墨西哥Oaxaca中部山谷盆地地下水水位下降进行了研究,发现土地利用方式的转变和人口增长是地下水位下降的主导因素。Liu等^[19]、熊黑钢等^[20]、杨怀德等^[21]和Huo等^[22]分别对

收稿日期: 2019-08-22; 修订日期: 2020-01-06

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001-02)

作者简介: 赵玉峰(1991-),男,山西右玉人,硕士,研究方向为水资源管理。E-mail: 468624617@qq.com

通讯作者: 罗专溪(1979-),男,福建泉州人,博士,副研究员,研究方向为水文地理学。E-mail: zxlue@iue.ac.cn

我国胜利渠灌区、天山北坡灌区和民勤绿洲地下水位变化研究发现,地下水开采量、地下水灌溉、人口增长、粮食作物种植面积及产量等人类活动是造成地下水位下降的主要因素。由于特定区域的自然因素、社会经济状况差异显著,其地下水位演变特征与驱动因素会因此不同而有必要进行单独分析,以促进区域地下水的科学管理和持续利用。

目前对我国地下水位变化的研究主要集中在干旱区和半干旱地区,对京津冀西北地区的报道并不多见。张家口地区是京津冀西北地区重要的水源涵养区和生态屏障,也是“京津冀协同发展”战略的重要支撑区域,同时也是2022年冬奥会的举办地,具有至关重要的战略地位。张家口地区地处我国半湿润区向半干旱区过渡的农牧交错带,生态环境脆弱^[23,24],多年人均水资源量仅399 m³/人,属于严重缺水地区。地表水资源的匮乏使该区社会经济发展严重依赖地下水资源开采。自上世纪80年代以来,随着以谷物和蔬菜为代表的高耗水农作物和经济作物种植面积及有效灌溉面积的持续扩大^[25],张家口地区农业用水水源由地表水为主转向以地下水为主,机井建设数量和地下水开采量逐年增加。从2005年起,地下水年供水量占全年总供水量的比例均在70%以上,且开采总量不断增加,水资源态势日趋紧张。在全球气候变暖的大背景下,张家口市水资源短缺程度将不断加剧、地下水超采问题也会越来越突出^[26-30],这不仅影响本区域的社会经济可持续发展、同时也会对京津冀都市圈生态系统健康和“京津冀协同发展”战略的实施带来威胁。因此,研究张家口地区地下水位时空演变规律及驱动因素,对京津冀西北地区水资源的可持续利用和合理调配、发挥对京津冀地区水源涵养功能具有重要意义。

本文利用京津冀西北典型区域张家口地区1981—2015年56个地下水位观测井的实测数据资料,以揭示张家口地区35年来地下水位时空演变规律,同时结合水文地质资料、气象数据和社会经济数据,分析张家口坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地四个地貌单元地下水位变化的关键驱动因子,以期对京津冀西北地区地下水资源合理利用和保护提供理论依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

1.1.1 地质地貌

张家口位于华北地台北缘,尚义—赤城深大断裂横贯中部,在其南北两侧形成了两个大地构造单元。北侧为内蒙古地轴,长期隆起而稳定,地质作用表现为缓慢的风化剥蚀。南侧为燕山台褶带,构造变动强烈,表现为盆地周边山区的不断上升和盆地自身的相对沉降。区内各种体系的断层、褶皱发育,这些构造对区内地质、地貌、水文地质条件起控制作用。本区域地形自西北向东南倾斜,阴山山脉横贯中部,形成以其为轴线向南北两侧倾斜的坝下中低山盆地和坝上高原两个截然不同的地貌单元。坝上高原地形较为平坦,残丘、岗梁、滩地、湖淖相间分布,为典型的波状高原。坝下地区较大山脉众多,区内群山之间因构造切割形成串珠状盆地,较大的有柴沟堡—宣化盆地、涿鹿—怀来盆地、蔚县—阳原盆地^[31]。

1.1.2 气象水文

本区属温带大陆性季风气候,春季多风少雨,冬季漫长寒冷,夏季短促炎热,四季分明。降雨多集中于7-8月份,且多为阵雨。1981—2015年多年平均温度5~6℃、降雨量

387 mm, 蒸发量 1765.6 mm, 蒸降比达 4.56。根据气候特征的差异, 又分为坝上寒温区和坝下凉温区。本区坝下盆缘山地、河间山地及坝上高原丘陵区, 基岩裸露, 裂隙发育, 为地下水补给区。坝下盆地山前倾斜平原的上部, 无良好隔水层分布, 砂卵石裸露地表, 透水性强, 为地下水的补给径流区。在坝下盆地山前倾斜平原的中部至前缘, 人口集中, 工农业发达, 地下水开采量较多, 为径流排泄区。各大河流及其两岸冲洪积交汇部位、湖淖及其周围构成地下水天然排泄区。此外, 蒸发作用是地下水排泄的又一重要方式。

1.1.3 社会经济

张家口位于京津冀西北地区 ($39^{\circ}30' \sim 42^{\circ}10'N$, $113^{\circ}50' \sim 116^{\circ}30'E$)。北和西北与内蒙古自治区相邻、西南与山西省接壤、东和东南与承德市、北京市、保定市相连, 总面积约 36965 km^2 。自 1981 年以来社会经济持续快速发展, 2015 年第一、第二、第三产业比例为 17.4 : 38.1 : 44.5, 地下水耗水比例为 70 : 13 : 17, 年产值较 1981 年分别增加了 194.1 亿、430.2 亿、503.3 亿。第一产业主要以农业和畜牧业为主, 农业种植以玉米、小麦和蔬菜等高耗水粮食作物和经济作物为主, 畜牧业以草原畜牧业为主。第二、三产业分别以传统工业、旅游业和住宿餐饮业为主。张家口在 1981—2015 年年末常住人口由 342.2 万人增至 426.4 万人, 城市化率由 16.9% 上升至 53.5%, 耕地面积和有效灌溉面积持续扩大, 粮食和蔬菜年产量增幅分别为 38.9 万 t、708.1 万 t, 猪牛羊肉类年产量由 3 万 t 增至 29 万 t。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

地下水位数据来源于河北省地矿局第三地质大队布设于该区域的 (赤城和崇礼区属于坝下山区, 地下水位监测工作开展较晚, 暂无长期对应年限水位数据) 56 个水位观测井长期、连续数据, 时间序列长度为 35 年 (1981—2015 年), 空间涵盖了张家口四个地貌单元及所辖各区县 (图 1)。地质及水文地质数据源自河北省地矿局第三地质大队《河北省张家口市地质环境监测报告》。1991—2015 年地下水开采量数据来自于河北省及张家口市《水资源公报》。1981—2015 年常用耕地面积、有效灌溉面积和蔬菜总产量等社会经济数据来自于《张家口经济年鉴》, 降雨量、蒸发量和气温等自然因素数据来自于中国气象数据网。

1.2.2 研究方法

基于研究区社会经济、气象水文、地质地貌条件的差异性, 将研究区划分为坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地四个地貌单元。用 ArcGIS 10.2 软件绘制地下水位观测井站点及气象站点分布图和地

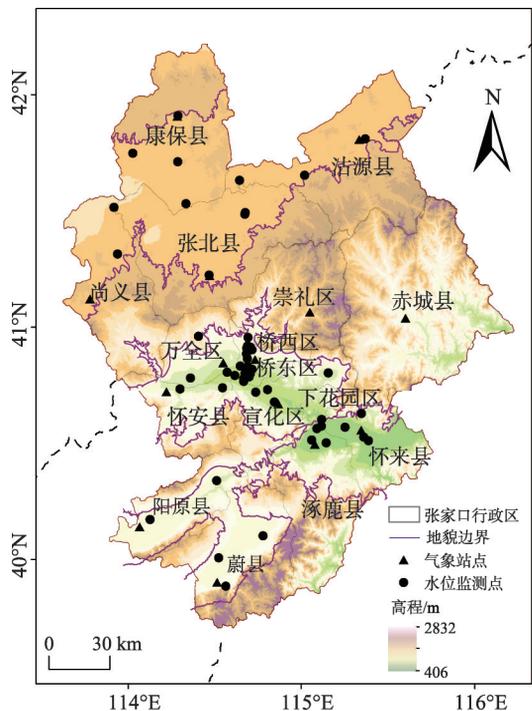


图 1 张家口地区地下水位观测井及气象监测站点
Fig. 1 Selected wells of groundwater level observation and meteorological stations in Zhangjiakou area

下水位空间变化图。用Origin 9.65软件绘制地下水位时间变化图；降雨量、蒸发量及气温变化情况图；地下水资源开采及其利用结构图和主成分分析图。用SPSS 22.0软件进行相关性分析和主成分分析。

2 结果分析

2.1 地下水位时空演变规律

2.1.1 时间变化规律

张家口坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地四个地貌单元及其所在各区县地下水时间变化如图2所示。坝上高原及其所在各区县在1981—2015年地下水位变化(图2a)情形可分为1981—1996年、1996—2008年和2008—2015年三个阶段。1981—1996年地下水位呈小幅波动趋势,其中坝上高原、张北县和康保县地下水位分别上升0.06 m、0.38 m和0.03 m;而沽源县和尚义县分别下降0.46 m和0.08 m。1996—2008年呈整体快速下降的趋势,坝上高原、张北县、康保县、沽源县和尚义县降幅分别为3.02 m、4.35 m、2.37 m、1.83 m和2.71 m。2008—2015年大部分地区呈下降趋势(除康保县地下水位上升1.28 m外),但降幅不一。其中坝上高原、沽源县和尚义县地下水位下降较缓,降幅分别为0.63 m、0.24 m和0.18 m,但张北县地下水位快速下降,降幅为2.86 m。

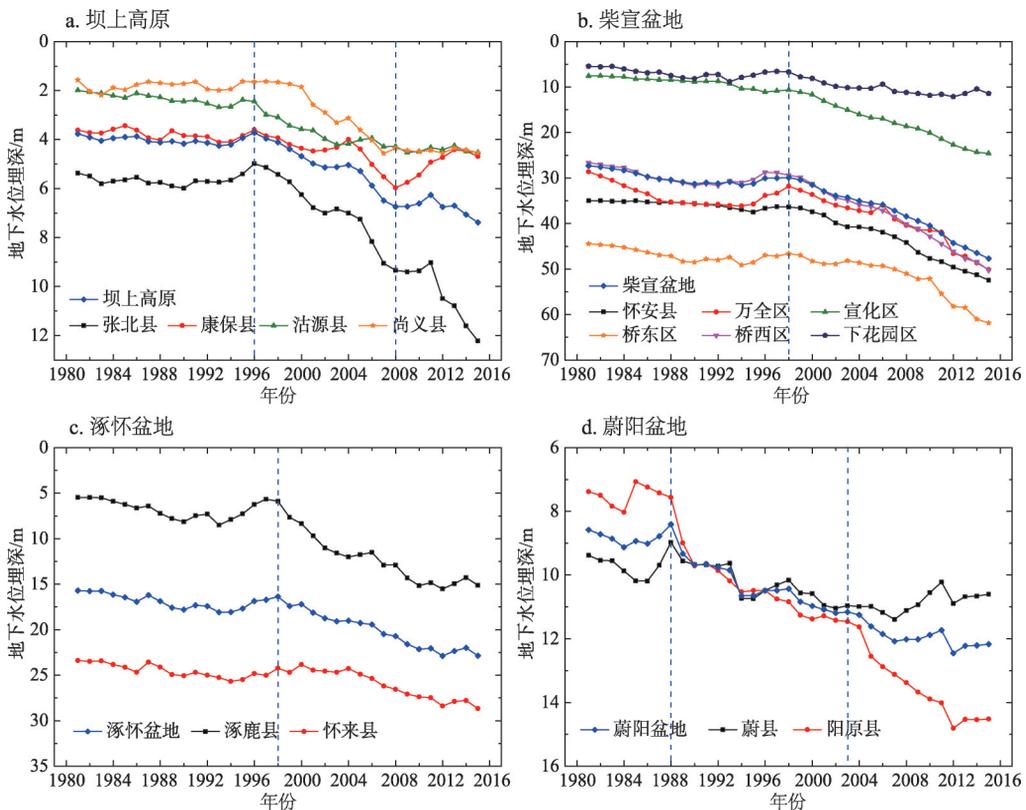


图2 1981—2015年张家口地区四个地貌单元及所辖各区县地下水位变化情况

Fig. 2 Groundwater level changes in four geomorphic units, and districts and counties in Zhangjiakou area from 1981 to 2015

柴宣盆地及其所在各区县在1981—2015年地下水位变化(图2b)情形可分为1981—1998年、1998—2015年两个阶段。1981—1998年地下水位呈波动下降趋势,柴宣盆地、怀安县、万全区、宣化区、桥东区、桥西区和下花园区降幅分别为2.64 m、1.4 m、3.18 m、3.05 m、2.2 m、2.74 m和1.25 m。1998—2015年呈急速下降的趋势(除下花园区下降较缓外),柴宣盆地、怀安县、万全区、宣化区、桥东区和桥西区降幅分别为17.77 m、16.09 m、18.30 m、13.94 m、15.21 m、20.83 m,下花园区降幅4.75 m。

涿怀盆地及其所在各区县在1981—2015年地下水位变化(图2c)情形可分为1981—1998年、199—2015年两个阶段。1981—1998年地下水位呈小幅波动趋势,涿怀盆地、涿鹿县和怀来县地下水位降幅分别为0.67 m、0.42 m、0.86 m。1998—2015年呈快速下降的趋势,涿怀盆地、涿鹿县和怀来县降幅分别为6.49 m、9.24 m、4.43 m。

蔚阳盆地及其所在各区县在1981—2015年地下水位变化(图2d)情形可分为1981—1988年、1988—2003年和2003—2015年三个阶段。在1981—1988年地下水位呈小幅波动趋势,其中蔚阳盆地和蔚县地下水位分别上升0.17 m和0.4 m,而阳原县下降0.18 m。1988—2003年呈快速下降趋势,蔚阳盆地、蔚县和阳原县降幅分别为2.75 m、1.99 m、3.9 m。2003—2015年地下水位呈下降趋势,但降幅不一。其中蔚阳盆地地下水位下降较缓,降幅为1.01 m;蔚县地下水位呈波动上升的趋势,水位上升0.36 m;阳原县地下水位呈快速下降趋势,水位降幅为3.06 m。

2.1.2 空间变化规律

张家口各区县1981—2015年地下水位呈整体下降趋势如图3所示。按各区县地下水位下降幅度由小到大情况分析如下:康保县和蔚县地下水位降幅区间为1.06~1.22 m,水位降幅分别为1.06 m和1.22 m。沽源县和尚义县地下水位降幅区间为1.23~2.97 m,水位降幅分别为2.53 m和2.97 m。张北县、阳原县、下花园区、涿鹿县和怀来县地下水位降幅区间为2.98~9.66 m,水位降幅分别为6.84 m、7.14 m、6 m、9.66 m和5.3 m。桥东区、宣化区和怀安县地下水位降幅区间为9.67~17.48 m,水位降幅分别为17.41 m、16.99 m和17.48 m。桥西区和万全区地下水位降幅区间为17.49~23.57 m,水位降幅分别为23.57 m和21.49 m。据35年间研究区内布设的56个水位监测点数据可知四个地貌单元地下水位降幅为:坝上高原(3.59 m) < 蔚阳盆地(3.6 m) < 涿怀盆地(7.17 m) < 柴宣盆地(20.41 m),其中柴宣盆地及其下辖各区县地下水位下降情况最为严重。

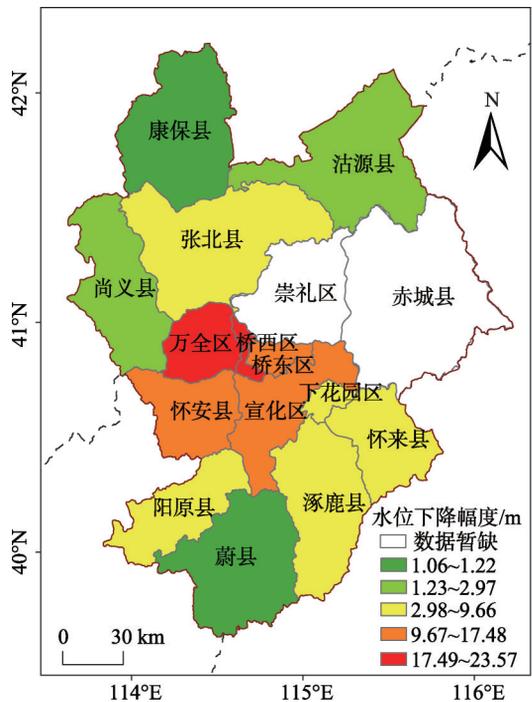


图3 1981—2015年张家口地区各区县地下水位空间变化情况

Fig. 3 Spatial variation of groundwater level in Zhangjiakou area from 1981 to 2015

2.2 地下水位时空变化的驱动因素分析

2.2.1 相关性分析

(1) 因子筛选

自然因素中降雨量、蒸发量和气温与地下水位变化理论上具有很强的相关性。采用趋势线法对张家口地区四个地貌单元1981—2015年降雨量、蒸发量和气温（均为年均值）变化情况进行了分析（图4），发现坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地的降雨量总体呈缓慢上升趋势，上升速率分别为0.01 mm/a、1.2 mm/a、1.7 mm/a和0.67 mm/a；蒸发量除坝上高原呈总体下降趋势外，柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地均呈缓慢上升趋势，上升速率分别为0.75 mm/a、8.23 mm/a和3.96 mm/a；气温均呈总体上升趋势且上升幅度较大，上升速率分别为0.04 °C/a、0.03 °C/a、0.05 °C/a和0.06 °C/a。

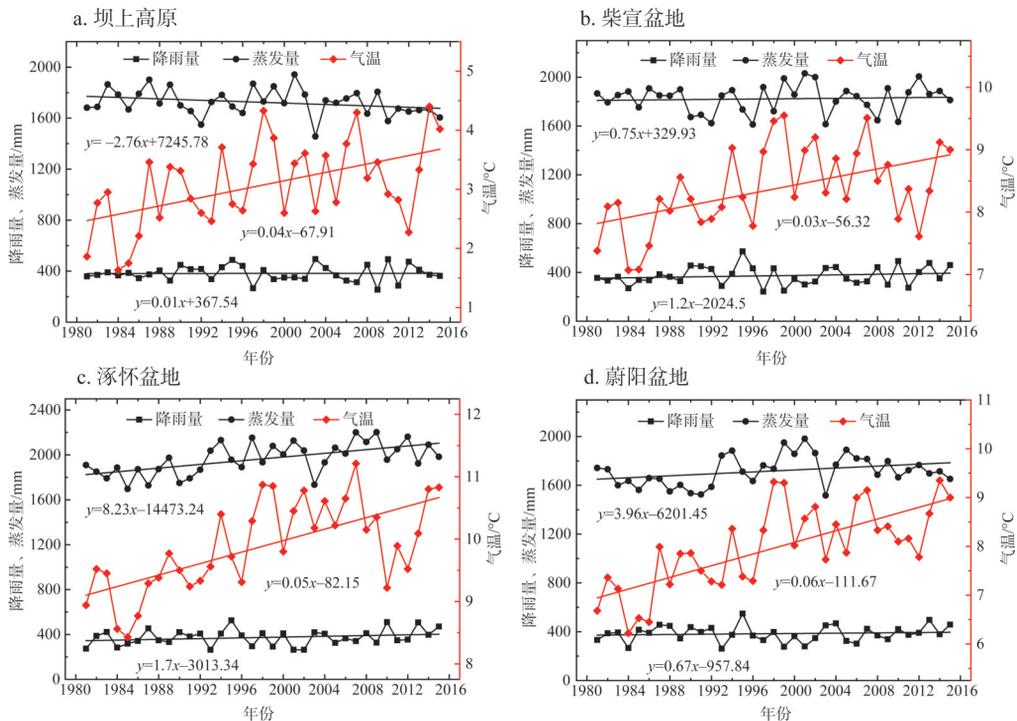


图4 1981—2015年张家口地区四个地貌单元降雨量、蒸发量及气温变化情况

Fig. 4 Precipitation, evaporation and temperature changes of four geomorphological units in Zhangjiakou area from 1981 to 2015

此外，地下水超采是导致地下水位下降的直接因素，通过分析地下水资源开采状况及利用结构有利于筛选影响地下水位变化的变量。张家口地区及四个地貌单元1991—2015年地下水资源开采及其利用情况如图5所示。张家口地区25年间地下水开采量总计165.97亿 m^3 ，农业、工业及生活用水量分别占60.95%、19.17%、19.88%。坝上高原、涿怀盆地和蔚阳盆地地下水开采总量中农业用水量占比在74.99%~85.6%，农业用水是地下水位下降的直接主导因素。柴宣盆地地下水开采量占张家口地区地下水开采总量的49.27%，农业、工业及生活用水量分别占本地貌单元地下水开采总量的42.5%、29.42%、28.02%，地下水资源利用结构较为均衡，工业和生活用水量占比相对较高，也是影响地下水位下降的主要因素。

基于研究区地下水资源开采及利用情况、地下水水位驱动因素的相关研究成果^[17-22,32,33]对影响地下水位的变量进行筛选。选取12个($X_1 \sim X_{12}$)对研究区地下水水位变化具有重要影响的变量,其中降雨量 X_1 、蒸发量 X_2 和气温 X_3 作为表征自然因素的影响因子;第一产业产值 X_4 、常用耕地面积 X_5 、有效灌溉面积 X_6 、粮食年产量 X_7 、蔬菜年产量 X_8 和猪牛羊肉年产量 X_9 作为表征农业用水的影响因子;第二产业产值 X_{10} 作为表征工业用水的影响因子;第三产业产值 X_{11} 和年末常住人口 X_{12} 作为表征生活用水的影响因子。分析时以坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地的水位降幅为因变量 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 。

(2) 相关性分析

张家口地区坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地四个地貌单元地下水水位变化与各变量相关性分析结果如表1所示。在自然因素中,降雨量 X_1 与地下水水位相关性不显著;蒸发量 X_2 仅与涿怀盆地 Y_3 地下水水位显著相关($P < 0.05$);气温 X_3 仅与坝上高原 Y_1 和蔚阳盆地 Y_4 地下水水位存在极显著相关($P < 0.01$)。在农业用水因素中,第一产业产值 X_4 、蔬菜年产量 X_8 、猪牛羊肉年产量 X_9 与地下水水位存在极显著的正相关性($P < 0.01$),此外常用耕地面积 X_5 与坝上高原 Y_1 、涿怀盆地 Y_3 和蔚阳盆地 Y_4 地下水水位存在极显著的负相关性($P < 0.01$)。有效灌溉面积 X_6 与坝上高原 Y_1 和涿怀盆地 Y_3 地下水水位存在显著相关($P < 0.01$, $P < 0.05$)。粮食年产量 X_7 与柴宣盆地 Y_2 和涿怀盆地 Y_3 地下水水位存在显著相关($P < 0.01$)。在工业及生活用水因素中第二产业产值 X_{10} 、第三产业产值 X_{11} 和年末常住人口 X_{12} 与地下水水位均存在极显著的正相关性($P < 0.01$)。综上可见,表征农业用水的第一产业产值、常用耕地面积、有效灌溉面积、粮食年产量、蔬菜年产量和肉类年产量等变量是张家口市四个地貌单元及下辖各区县地下水水位变化的主导性相关因子。

表1 张家口地区四个地貌单元地下水水位变化因素的相关性分析

Table 1 Correlation of groundwater level and its driving factors in four geomorphic units in Zhangjiakou area

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
Y_1	-0.163	-0.144	0.566**	0.897**	-0.862**	0.865**	0.121	0.956**	0.781**	0.829**	0.935**	0.757**
Y_2	0.095	0.153	0.335	0.976**	0.404	-0.278	0.724**	0.905**	0.978**	0.974**	0.987**	0.757**
Y_3	0.350	0.487*	0.399	0.924**	-0.724**	-0.490*	0.580**	0.699**	0.947**	0.954**	0.942**	0.905**
Y_4	0.007	0.275	0.773**	0.762**	-0.707**	0.245	-0.068	0.825**	0.923**	0.835**	0.834**	0.950**

注: *、**分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 。

2.2.2 主成分分析

基于地下水水位与各潜在变量的相关性分析结果,选取与地下水水位变化显著相关的变量进行主成分分析(表2、图6)。研究表明,坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地、蔚阳盆

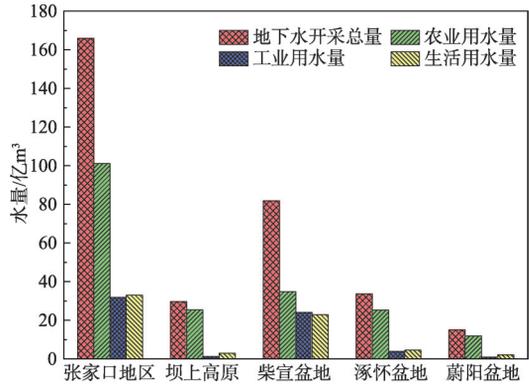


图5 1991—2015年张家口地区及四个地貌单元地下水资源开采及其利用情况

Fig. 5 Exploitation and utilization of groundwater resources in Zhangjiakou area and four geomorphic units from 1991 to 2015

表2 张家口地区四个地貌单元地下水位变化因素主成分分析

Table 2 Principal component analysis of groundwater level variation factors in four geomorphic units in Zhangjiakou area

变量	坝上高原 Y_1		柴宣盆地 Y_2		涿怀盆地 Y_3		蔚阳盆地 Y_4	
	PCA1	PCA2	PCA1	PCA2	PCA1	PCA2	PCA1	PCA2
降雨量 X_1 /mm	—	—	—	—	—	—	—	—
蒸发量 X_2 /mm	—	—	—	—	0.05	-0.65	—	—
气温 X_3 /°C	0.59	-0.48	—	—	—	—	0.74	-0.5
第一产业产值 X_4 /亿元	0.92	0.38	0.97	0.17	0.97	0.16	0.92	0.34
常用耕地面积 X_5 /hm ²	-0.88	0.18	—	—	-0.66	0.48	-0.63	0.6
有效灌溉面积 X_6 /hm ²	0.93	-0.09	—	—	-0.49	-0.36	—	—
粮食年产量 X_7 /t	—	—	0.73	0.63	0.65	0.6	—	—
蔬菜年产量 X_8 /t	0.98	0.08	0.92	-0.31	0.8	0.24	0.89	0.01
猪牛羊肉年产量 X_9 /t	0.87	-0.39	0.99	-0.02	0.97	-0.18	0.98	0.01
第二产业产值 X_{10} /亿元	0.85	0.49	0.98	0.03	0.99	0.06	0.93	0.25
第三产业产值 X_{11} /亿元	0.94	0.32	0.98	0.08	0.98	0.1	0.94	0.23
年末常住人口 X_{12} /万人	0.82	-0.35	0.8	-0.56	0.9	-0.29	0.96	-0.03
方差贡献率/%	75.68	11.44	83.93	12.02	66.05	14.58	77.82	10.51
累计方差贡献率/%	75.68	87.12	83.93	95.95	66.05	80.63	77.82	88.33

地前两个主成分分量累计方差贡献率均在80%以上,说明主成分分析结果很好的解释了不同地貌单元地下水位动态变化的驱动因素。

在坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地的特征指标中第一主成分分量的方差贡献率分别为75.68%、83.93%、66.05%、77.82%,主要反映了第一产业产值、蔬菜年产量、猪牛羊肉年产量、第二产业产值、第三产业产值和年末常住人口等社会经济因素的信息,说明第一产业产值、蔬菜年产量、猪牛羊肉年产量、第二产业产值、第三产业产值和年末常住人口等是张家口地区四个地貌单元地下水位变化的关键影响因子。此外,坝上高原还包括气温、有效灌溉面积和常用耕地面积;柴宣盆还包括粮食总产量,涿怀盆地还包括蒸发量、常用耕地面积和粮食总产量,而蔚阳盆地还包括气温和常用耕地面积,说明不同地貌单元地下水位变化的驱动因素不尽相同,分析它们的变化驱动因素时需区别对待。

综上所述,降雨量、蒸发量和气温等自然因素对张家口地区地下水位变化的影响较小,社会经济因素是地下水位下降的主导因素。其中第一产业(以农业种植、草原畜牧业和养殖业为主)产值、常用耕地面积、有效灌溉面积、粮食年产量、蔬菜和肉类年产量等与农业用水相关的变量是张家口地区地下水位下降的关键影响因素且对四个地貌单元地下水位下降的影响方式略有差异。坝上高原表现为以苜蓿、马铃薯、蔬菜为主的粮食作物和高耗水经济作物种植面积及有效灌溉面积的持续扩大和产量的快速增长,草原畜牧业的发展以肉类年产量大幅增长为主要表现形式;柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地表现为以玉米、谷子、蔬菜为主的高耗水粮食作物和经济作物种植面积持续扩大及产量的快速增长,马铃薯和豆类单位面积产量大幅提高,养殖业均以肉类年产量大幅增长为主要表现形式。此外,第二产业(以传统工业为主)产值、第三产业(以旅游业、住宿餐饮业为主)产值及人口的增长等与工业及生活用水相关的变量也是本地区地下水位下

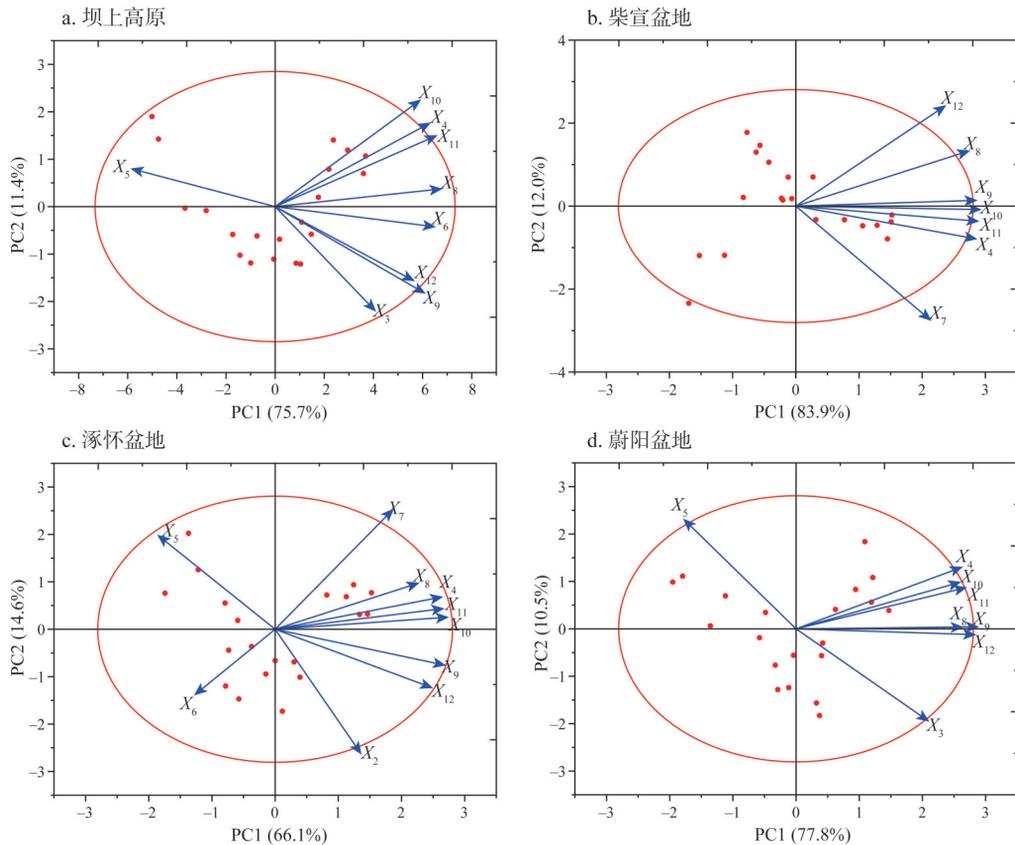


图6 张家口地区四个地貌单元地下水变化因素主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of groundwater level variation and its driving factors in four geomorphological units in Zhangjiakou area

降的关键影响因素。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 京津冀西北张家口地区坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地四个地貌单元的地下水位在1981—2015年间由小幅波动变化、缓慢下降趋势转变为近线性趋势整体大幅下降，下降速率加快。在空间上，坝上高原水位降幅3.59 m<蔚阳盆地水位降幅3.6 m<涿怀盆地水位降幅7.17 m<柴宣盆地水位降幅20.41 m，各县区水位降幅各有差异。

(2) 京津冀西北张家口地区1981—2015年四个地貌单元的地下水位变化受降雨量、蒸发量、气温等自然因素影响较小，社会经济因素是地下水位下降的主导因素。第一产业产值、常用耕地面积、有效灌溉面积、粮食总产量、蔬菜总产量、猪牛羊肉总产量、第二产业产值、第三产业产值和年末总人口是影响张家口地区地下水位动态变化的关键驱动因子，由于研究区域四个地貌单元地质地貌、气象水文、社会经济的差异性，各地貌单元地下水位驱动因子略有差异。

(3) 在政策上建议通过“开源节流”措施，增加地下水补给量、减少地下水开采量

来促进地下水位的回升。尤其是第一产业,张家口地区应积极调整农业结构,推行雨养高效种植,压缩有效灌溉面积,推广高效节水灌溉技术,提高农田灌溉水有效利用率。其中坝上高原主要可发展高效节水蔬菜,并基于草场承载力合理控制草场载畜量;坝下柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地重点发展设施节水蔬菜。

3.2 讨论

本文较相关学者^[17-22]在地下水位变化及驱动因素的研究中,地下水位观测数据时间序列更长且研究区范围更广涵盖了张家口地区坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地四个地貌单元,其驱动因素分析更为全面、深入,重点突出社会经济因素。研究结果显示京津冀西北张家口地区地下水位持续下降,全区应进一步贯彻落实《张家口首都水源涵养功能区和生态环境支撑区研究规划(2018—2035年)》及《张家口首都水源涵养功能区和生态环境支撑区建设行动计划(2018—2021年)》,总结治理经验,巩固治理成果。

通过“开源节流”措施,增加地下水补给量、减少地下水开采量来促进地下水位的回升。“开源”措施包括水源涵养建设(提高森林、草地、湿地的面积)、地表蓄水工程建设、优化水资源配置、跨流域调水、再生水与雨水利用工程。未来通过植树造林、草场建设、湿地恢复等生态工程建设,提高水资源涵养量;开展地表水蓄水工程建设,新建及维护现有水库设施,加快桑干河、洋河、清水河、白河综合治理和生态修复,提高地表蓄水能力;优化水资源配置,由上游册田水库、友谊水库向桑干河、洋河进行生态补水;进行跨流域调水,引黄济张入京;同时加快主城区及各县区污水处理厂扩建,提高再生水供水能力;最后提高雨水资源化利用率,如在主城区及各县区海绵城市建设、农村蓄水坑塘及集水工程建设。

“节流”措施基于京津冀西北张家口地区地下水位变化的驱动因素分析应涵盖第一、第二、第三产业。第一产业应积极调整农业结构,推行雨养高效种植,压缩有效灌溉面积,推广高效节水灌溉技术,提高农田灌溉水有效利用率。坝上高原压减有效灌溉面积,推行旱作雨养种植、引导农民退旱还林还草,加强已“开垦撂荒草原”的治理工作;坝下地区根据《河北省永定河综合治理与生态修复实施方案》,将部分水浇地变为旱作雨养农田、实施抗旱保墒耕作方法,变灌溉高产种植为雨养高效种植。蔬菜种植方面逐步压减大白菜、芹菜等高耗水蔬菜种植面积,坝上高原主要发展高效节水蔬菜,坝下柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地重点发展设施节水蔬菜。畜牧业方面坝上高原要基于草场承载力合理控制草场载畜量,逐步推广舍饲畜牧业,推进青贮窖、贮草棚与暖棚建设、草业畜牧机械化进程;坝下盆地可促进养殖业的规模化、产业化发展。

第二产业要抓住“京津冀协同发展”战略和“绿色奥运”的机遇,在承接产业转移时要严格环保准入制度,淘汰一批有色金属、建材、化工、机械等高耗能高污染的行业和生产工艺,重点开展火电、钢铁、化工、建材、食品等高耗水企业的节水技术推广。加快发展高端装备制造、可再生能源装备制造业和冰雪装备器材等先进装备制造业,打造电子信息、航空航天、新材料、节能环保、生物医药等战略性新兴产业集群。

第三产业应大力发展现代服务业,重点发展绿色生态旅游、商贸物流、电子商务和金融保险、信息会展等现代服务业。同时加大现有供水管网改造力度,减少供水管网漏失率,大力推广节水设备和节水器具,普及节约用水理念。推进学校、医院、宾馆、餐饮、洗浴等重点行业的节水技术改造,全面加快节水型公共机构、居民小区建设。

参考文献(References):

- [1] 陈梦熊, 马凤山. 中国地下水资源与环境. 北京: 地震出版社, 2002: 16-120. [CHEN M X, MA F S. Groundwater Resources and Environment in China. Beijing: Seismological Press, 2002: 16-120.]
- [2] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120. [ZHANG L P, XIA J, HU Z F. Situation and problem analysis of water resource security in China. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 116-120.]
- [3] 王贵玲, 陈德华, 蔺文静, 等. 中国北方地区地下水资源的合理开发利用与保护. 中国沙漠, 2007, (4): 684-689. [WANG G L, CHEN D H, LIN W J, et al. Reasonable exploitation and utilization of groundwater resource in North China. Journal of Desert Research, 2007, (4): 684-689.]
- [4] 王仕琴, 宋献方, 王勤学, 等. 华北平原浅层地下水水位动态变化. 地理学报, 2008, 63(5): 435-445. [WANG S Q, SONG X F, WANG Q X, et al. Dynamic features of shallow groundwater in North China Plain. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 435-445.]
- [5] 边静. 松嫩平原(吉林)地下水动态特征及可持续利用研究. 吉林: 吉林大学, 2016. [BIAN J. Study on groundwater dynamic characteristics and sustainable utilization in Songnen Plain (Jilin). Jilin: Jilin University, 2016.]
- [6] 丁宏伟, 张荷生. 近50年来河西走廊地下水资源变化及对生态环境的影响. 自然资源学报, 2002, 17(6): 691-697. [DING H W, ZHANG H S. Changes of groundwater resources in recent 50 years and their impact on ecological environment in Hexi Corridor. Journal of Natural Resources, 2002, 17(6): 691-697.]
- [7] WINE M L, RIMMER A, LARONNE J B. Agriculture, diversions, and drought shrinking Galilee Sea. Science of the Total Environment, 2019, 651: 70-83.
- [8] SAHOO S, RUSSO T A, ELLIOTT J, et al. Machine learning algorithms for modeling groundwater level changes in agricultural regions of the United States. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3878-3895.
- [9] DAI L, GUO X, DU Y, et al. The response of shallow groundwater levels to soil freeze-thaw process on the Qinghai-Tibet Plateau. Groundwater, 2019, 57(4): 602-611.
- [10] HACHBORN E, BERG A, LEVISON J, et al. Sensitivity of GRACE-derived estimates of groundwater-level changes in Southern Ontario, Canada. Hydrogeology Journal, 2017, 25(8): 2391-2402.
- [11] ZHAO Z, JIA Z, GUAN Z, et al. The effect of climatic and non-climatic factors on groundwater levels in the Jinghuiqui Irrigation district of the Shaanxi province, China. Water, 2019, 11(5): 956.
- [12] CHEN H, ZHANG W, NIE N, et al. Long-term groundwater storage variations estimated in the Songhua River Basin by using GRACE products, land surface models, and in-situ observations. Science of the Total Environment, 2019, 649: 372-387.
- [13] WUNSCH A, LIESCH T, BRODA S. Forecasting groundwater levels using nonlinear autoregressive networks with exogenous input (NARX). Journal of Hydrology, 2018, 567: 743-758.
- [14] QIU L, HUANG J, NIU W. Decoupling and driving factors of economic growth and groundwater consumption in the Coastal Areas of the Yellow Sea and the Bohai Sea. Sustainability, 2018, 10(11): 4158.
- [15] GARAMHEGYI T, KOVÁCS J, PONGRÁCZ R, et al. Investigation of the climate-driven periodicity of shallow groundwater level fluctuations in a Central-Eastern European agricultural region. Hydrogeology Journal, 2018, 26(3): 677-688.
- [16] XIA J, WU X, ZHAN C, et al. Evaluating the dynamics of groundwater depletion for an Arid Land in the Tarim Basin, China. Water, 2019, 11(2): 186.
- [17] SATTARI M T, MIRABBASI R, SUSHAB R S, et al. Prediction of groundwater level in Ardebil plain using support vector regression and M5 tree model. Groundwater, 2018, 56(4): 636-646.
- [18] OJEDA OLIVARES E A, SANDOVAL TORRES S, BELMONTE JIMÉNEZ S I, et al. Climate change, land use/land cover change, and population growth as drivers of groundwater depletion in the Central Valleys, Oaxaca, Mexico. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1290.
- [19] LIU Z, ZHAO Y, HAN Y, et al. Driving factors of the evolution of groundwater level in People's Victory Canal Irrigation district, China. Desalination and Water Treatment, 2018, 112: 325-333.
- [20] 熊黑钢, 赵明燕, 陈西政, 等. 天山北坡井灌区地下水埋深动态变化的驱动力及预测模型研究. 干旱区资源与环境,

- 2012, 26(6): 139-143. [XIONG H G, ZHAO M Y, CHEN X M, et al. The driving forces of groundwater depth dynamic change in the well irrigation area of northern piedmont of Tianshan Mountains and the prediction model. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(6): 139-143.]
- [21] 杨怀德, 冯起, 郭小燕, 等. 基于回归模型预测的民勤绿洲地下水水位动态驱动因子分析. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 98-103. [YANG H D, FENG Q, GUO X Y, et al. Analysis on the variation of groundwater level and its influence factors in Minqin Oasis based on the regression model. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(2): 98-103.]
- [22] HUO Z, FENG S, KANG S, et al. Numerically modelling groundwater in an arid area with ANN generated dynamic boundary conditions. *Hydrological Processes*, 2011, 25(5): 705-713.
- [23] 孙杰肖. 张家口市水中长期供需预测及平衡分析. 保定: 河北农业大学, 2013. [SUN J X. Medium and long-term supply and demand forecasts and balance analysis in water resources of Zhangjiakou city. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013.]
- [24] 李文龙, 石育中, 鲁大铭, 等. 北方农牧交错带干旱脆弱性时空格局演变. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1599-1612. [LI W L, SHI Y Z, LU D M, et al. The spatio-temporal evolution of drought vulnerability in the ecotone between agriculture and animal husbandry in the north of China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1599-1612.]
- [25] LI J Z, ZENG X Z, CARLSON K M, et al. Progress towards sustainable intensification in China challenged by land-use change. *Nature Sustainability*, 2018, 1(6): 304-313.
- [26] 李海涛, 于贵瑞, 袁嘉祖. 中国现代气候变化的规律及未来情景预测. *中国农业气象*, 2003, (4): 2-5. [LI H T, YU G R, YUAN J Z. Pattern and cause of current climate change in China and prediction of climate scenarios. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, (4): 2-5.]
- [27] 刘星燕, 黄山江, 苗志成, 等. 张家口近48年气温变化特征分析. *中国农学通报*, 2012, 28(32): 288-292. [LIU X Y, HUANG S J, MIAO Z C, et al. Analysis on the temperature variation in Zhangjiakou region in the past 48 years. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(32): 288-292.]
- [28] 张云娉, 刘爱梅, 苗志成, 等. 张家口近47年气候变化及其对水资源的影响. *中国农业气象*, 2008, (3): 277-280. [LIU X Y, HUANG S J, MIAO Z C, et al. Climate change over last 47 years in Zhangjiakou region and its impacts on water resources. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, (3): 277-280.]
- [29] 莫兴国, 胡实, 卢洪健, 等. GCM预测情景下中国21世纪干旱演变趋势分析. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1244-1256. [MO X G, HU S, LU H J, et al. Drought trends over the terrestrial China in the 21st century in climate change scenarios with ensemble GCM projections. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 1244-1256.]
- [30] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951—2014年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2149-2166. [LIANG L T, MA L, LIU T X, et al. The seasonal spatiotemporal variation of the temperature mutation and warming hiatus over Northern China during 1951-2014. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2149-2166.]
- [31] 孙丕苓, 许月卿, 王数. 环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 277-288. [SUN P L, XU Y Q, WANG S. Terrain gradient effect analysis of land use change in poverty area around Beijing and Tianjin. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(14): 277-288.]
- [32] 张文鸽, 黄强, 冯春生. 基于混沌优化的支持向量机地下水水位动态预测. *资源科学*, 2007, 23(5): 105-109. [ZHANG W G, HUANG Q, TONG C S. Dynamic prediction of groundwater level based on chaos optimization and support vector machine. *Resources Science*, 2007, 23(5): 105-109.]
- [33] 张展羽, 梁振华, 冯宝平, 等. 基于主成分一时间序列模型的地下水水位预测. *水科学进展*, 2017, 28(3): 415-420. [ZHANG Z Y, LIANG Z H, FENG B P, et al. Groundwater level forecast based on principal component analysis and multivariate time series model. *Advances in Water Science*, 2017, 28(3): 415-420.]

Spatio-temporal changes of groundwater level and its driving factors in a typical region of Beijing-Tianjin-Hebei region, China

ZHAO Yu-feng^{1,2}, LUO Zhuan-xi², YU Ya-jun¹, CHEN Ying-hui³,
ZHANG Shu-gang⁴, ZHANG Qing-hua²

(1. School of Geographical Science, Shanxi Normal University, Linfen 041000, Shanxi, China; 2. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, CAS, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. Third Geological Brigade, Geology and Minerals Bureau of Hebei Province, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 4. Exploration Center of Land and Resources, Geology and Minerals Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: The northwest of the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region is an important water conservation area and ecological barrier for Beijing and Tianjin. It is also an important regional support node for the "Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development strategy". In order to reveal the spatial and temporal changes of groundwater level and its driving factors in northwest BTH region, 56 wells of groundwater level observation were selected from 1981 to 2015 in Zhangjiakou city as a typical region. Based on continuous observation data on hydrogeology, meteorology, groundwater resources exploitation and socioeconomic development, the spatial and temporal changes of groundwater level and its statistical analysis with the abovementioned data were performed in four geomorphic units of Bashang Plateau, Chaixuan Basin, Zhuohuai Basin and Yuyang Basin in the study area. Results showed that the groundwater level of the four geomorphic units in Zhangjiakou and districts and counties under its jurisdiction in general tended to decrease, and the decrease rate was gradually accelerated. In the past 35 years, the groundwater level of Bashang Plateau decreased by 3.59 m < 3.6 m in Yuyang Basin < 7.17 m in Zhuohuai Basin < 20.41 m in Chaixuan Basin. The changes of groundwater level in the four geomorphic units were not significantly correlated with natural factors such as precipitation, evaporation and temperature, but significant correlation between the total population and other socio-economic factors, including primary industry output value, common cultivated land area, effective irrigation area, total grain output, total vegetable output, total pork, beef and mutton output, secondary industry output value, tertiary industry output value and year-end total population. In the principal component analysis, the cumulative variance contribution rate of the first two principal components of the four geomorphic units was more than 80%. The first principal component was mainly socio-economic factors such as total vegetable production, total pork, beef and mutton production, year-end total population and output value of the primary, secondary and tertiary industries. All the first two principal components in the four geomorphic units can explain more than 66%, indicating that socio-economy was the main factor leading to the continuous decline of groundwater level in Zhangjiakou. The findings can provide new insights into the sustainable development of social economy and the rational utilization and allocation of regional water resources in the future, as well as water conservation and ecological function maintenance in the northwest of the BTH region.

Keywords: groundwater level; driving factor; principal component analysis; water resources; Zhangjiakou