

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.01.018

银川平原地下水位变化特征及其成因分析

罗杰^{1,2}, 王文科^{1,2}, 段磊^{1,2}, 李英³, 张在勇^{1,2}

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水与生态效应教育部重点试验室, 陕西 西安 710054; 3. 宁夏回族自治区水文环境地质勘察院, 宁夏 银川 750011)

摘要:基于2013~2015年地下水的监测资料,通过SPSS聚类分析和土地利用类型,分析银川平原水位动态变化在时间尺度、空间尺度上的变化规律及影响因素。分析发现:银川平原地下水动态分为径流型、灌溉型、降水-蒸发型和开采型4种类型,其中人为影响地下水动态类型(灌溉型、开采型)分布最广,约占银川平原总面积的1/2。在时间尺度上,受不同因素的影响,4种动态类型变化趋势明显不同,从年内动态趋势看,径流型呈M型变化;灌溉型呈W型变化;降水-蒸发型呈 Δ 型变化;开采型呈Z型变化,对于开采型,通过模拟,认为夏季开采全年的45%~50%,冬季开采15%~20%是最优开采量。在空间尺度上,受地形因素影响,地下水动态类型自西向东呈径流型—开采型—灌溉型规律变化。在此基础上,探讨了银川平原地下水资源开采的合理方式,为地下水资源的可持续开发利用提供科学依据。

关键词:银川平原;地下水位动态类型;影响因素

中图分类号:P641.11

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)01-0195-10

Dynamic Analysis of Groundwater Level in Yinchuan Plain

LUO Jie^{1,2}, WANG Wenke^{1,2}, DUAN Lei^{1,2}, LI Ying³, ZHANG Zaiyong^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xian 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Groundwater and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of Ningxia, Yinchuan 750011, Ningxia, China)

Abstract: Based on the groundwater monitoring data from 2013 to 2015, SPSS cluster analysis and land-use-type were used to analyze the variation rules and influencing factors of the dynamic change of water level in Yinchuan plain on the time scale and space scale. It is found that the groundwater dynamics in Yinchuan plain are divided into four types: runoff type, irrigation type, rainfall-evaporation type and mining type. The dynamic types of human-influence (irrigation type and mining type) are widely distributed among them, accounting for about 1/2 of the total area of Yinchuan plain. In terms of time scale, the change trend of the four dynamic types is obviously different because of different influence factors. From the perspective of the dynamic trend of the whole year, the runoff-type shows M-type change. The irrigation-type shows W type change. Rainfall evaporation type shows Δ type change. The mining type shows Z type change. Through simulation, the optimal annual mining volume is 45%~50% in summer and 15%~20% in win-

收稿日期:2019-03-10;修回日期:2019-10-19

基金项目:国家自然科学基金“准噶尔盆地典型流域地表水与地下水转化的动力学机制与生态效应”(211029170033),宁夏自然科学基金“银川市地下水位时空演化、控制因素及生态效应研究”(2018AAC03205)

作者简介:罗杰(1993-),男,硕士,主要从事水文学及水资源研究工作。E-mail: 758314980@qq.com

ter. On the spatial scale, due to the influence of topographic factors, the groundwater dynamic type changed from west to east as runoff type, mining type and irrigation type. On this basis, a reasonable way of exploiting groundwater resources in Yinchuan plain is discussed, which provides a scientific proof for sustainable exploitation and utilization of groundwater resources.

Keywords: the Yinchuan plain; dynamic type of groundwater level; influencing factors

地下水位是一个地区地下水量多少的直观反映,地下水位动态不仅与气候(李琦,2015;GONG Jinnan et al.,2012;JARKKO Okkonen,2010)、水文(赵建忠等 2010;PHILIPPE et al.,2008)、植被(马雄德等,2017;古力米热·哈那提等,2018;MARINI L et al.,2008)、土壤(BHULLAR et al.,2013;杨胜科等,2002;P. BONNAUD et al.,2019)等关系密切,而且与人类活动息息相关。因此,对地下水位动态的监测和研究,是水资源评价工作的基础和关键(王仕琴等,2008),也是保护干旱地区生态环境的重要依据(黄金廷等,2011;杨泽元等,2009)。近些年,国内外有很多对地下水位动态及其影响因素的研究,如 SRdAN Kostić 等通过替代数据检验、决定论检验和 Box-Jenkins 方法对塞尔维亚地下水动态进行研究,确定了地表水位的动态变化有较强的影响,而降雨影响微弱(SRdAN Kostić et al.,2019);NIROSHAN Gunawardhana L N 通过情景模拟得出气候变化的影响能够达到更深的含水层,但影响成度会随着地表温度的瞬时变化和地下水补给速率的大小而变化(GUNAWARDHANA L N et al.,2012);胡海华等利用 Kendall 秩次相关系数和 Hurst 指数分析了地下水位的趋势性和持续性特征以及地下水下降原因(胡海华等,2016)。

地下水是银川平原居民生活和工业生产的主要水源(于艳青等,2002),银川平原因地处干旱地区,降水稀少,生态环境脆弱(王文科等,2004),银川平原属于中国地质环境中度脆弱区(王尧等,2019),地下水位对环境变化的响应非常敏感。地下水作为环境敏感因子,需受到格外关注。银川平原地下水与生态环境息息相关,2002 年国家对于宁夏从黄河的引水压减了 33%~52%,约有 13~20 万 hm^2 的耕地无法保证灌溉,由于引黄灌溉方式的不合理和人为盲目开采地下水导致了与地下水相关的土壤盐渍化、土地荒漠化、湖泊湿地面积萎缩,以及地下水水位持续下降等生态环境问题(王改平等,2006)。因此,对于预测及缓解银川平原地下水引起的相关问题,准确分析地下水位的变化规律及其影响机制是一种及其有效的手段。

目前也有对银川平原的此类分析,魏建成结合水文地质条件,将银川平原的潜水动态类型分为 4 种类型,但缺少对承压水的分析(魏建成,2006)。王枫结合多个监测孔资料将地下水动态分为 3 种类型,根据聚类分析以及多元线性回归模型分析地下水动态影响因素及其影响系数,虽给出银川平原地下水位主要影响因素,但并没有对各类型内在影响机制进行分析,且只在时间动态上进行分析,空间上分析尚不足(王枫,2017)。笔者有效利用已有的气象水文数据,对银川平原潜水位和承压水位动态类型进行分类,并根据土地利用类型进行系统分区,将更为直观地了解银川平原地下水的区域变化规律,并对其变化原因进行时间尺度和空间尺度的分析,对于明确银川平原地下水动态分区,指导银川平原各地区地下水的合理开采、有效灌溉及生态环境保护等有着重要的意义。

1 研究区概况

银川平原位于宁夏回族自治区北部,地处黄河中上游,南起青铜峡,北至石嘴山,西依贺兰山,东靠鄂尔多斯高原西缘;南北 165 km,东西宽 42~60 km,总面积为 7 790 km^2 ,海拔高度 1 100~1 200 m。行政区划隶属银川市、石嘴山市和吴忠市 10 个县(市),银川平原在地貌上由贺兰山山前洪积倾斜平原,黄河冲洪积、冲湖积平原组成;区内地形舒展平坦,多被垦为农田,灌溉渠系密布,是中国西北地区重要商品粮基地。

银川平原是新生代以来形成的地堑式断陷盆地(董佩等,2009)。从西部贺兰山山前洪积倾斜平原到东部黄河河漫滩地带,含水层结构从洪积扇及冲积扇由块石、卵砾石、砂卵砾石组成的单一潜水区过渡为河湖积平原区砂性土、黏性土粗细相间的多层含水层。单一潜水区为单一结构含水层,多层含水层分为三层,上层潜水含水层深度范围在 0~120 m;中层第一承压含水层深度范围在 20~210 m;下层第二承压含水层深度范围在 140~300 m。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

为了尽可能地了解银川平原地下水位变化规律及其影响因素,笔者采用的数据包括与宁夏回族自治区水文环境地质勘察院合作收集的 2013~2015 年银川平原的 77 个长观孔(潜水观测孔 53 个,承压水观测孔 24 个)的实测水位数据,水位数据每月进行一次记录,共 36 个月;从宁夏气象局收集银川、石嘴山、青铜峡等共 10 个气象站点的气象数据,数据为用 LoggerNet4.0 以 24 h 为时间间隔进行收集;主要渠系引水量状况与地下水开采量是从 2014 年宁夏水资源公报所得。土地利用类型是从美国地质调查局(USGS)下载得到。用于地下水数值建模的含水层结构参数、水力参数是通过银川市阅海湖模拟区 2 个点位的钻孔取心参数实验和音频电磁测深(AMT)所得。

2.2 研究方法

在探讨地下水位变化规律及成因分析时,通过 SPSS,运用聚类分析法,经过标准化、聚类、形成聚类谱系图,对不同变化趋势的地下水位监测点进行分类,将潜水动态类型分为 4 类,承压水动态类型分为 3 类;通过遥感解译的方式,确定土地利用类型,对地下水动态进行分类,并进行分区。在时间尺度上,分析不同类型地下水位变化因素时,使用了 2013~2015 年的气象数据、水文数据(包括冰雪融水数据、洪流量数据)、农业灌溉数据进行单因分析和比较分析,其中在分析降水-蒸发型地下水位变化时,结合矩阵散点图,相关性分析确定降水对地下水位变化的影响程度,在分析开采型地下水位变化时,采用了地下水数值模拟方法分析不同开采模式对地下水位的影响,确定最优开采量;在空间尺度上,采用 Arcgis 克里金插值方法,通过空间插值,得出不同季节下,各区域地下水的分布状况及变化形势。

3 地下水位动态变化类型

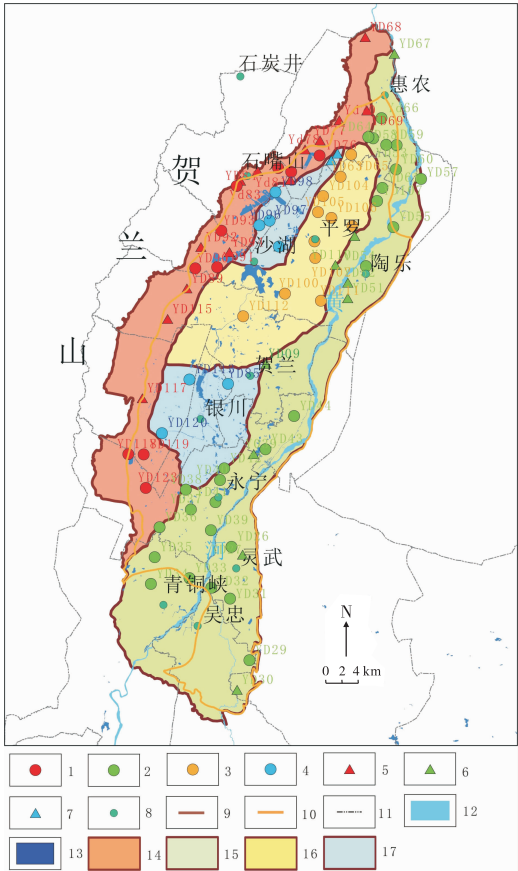
3.1 地下水动态变化类型分类

根据地下水动态影响因素,通过 SPSS 中 K-均值聚类分析,将银川平原潜水动态分为 4 类,承压水动态分为 3 类,根据分类后观测孔分布规律,结合土地利用类型和水文地质条件,进而将潜水位分为径流型、灌溉型、降水-蒸发型、开采型 4 种基本类型,承压水分为径流型、灌溉型、开采型 3 种基本类型

(表 1)。划分出 4 个地下水动态类型分区(图 1):贺兰山东麓冲洪积扇地区为弱富水性含水岩组和单一潜水区,地下水主要受侧向径流补给,为径流型;黄河河漫滩地带为富水性含水岩组,分布着大面积农灌区,为灌溉型;银川平原中部沙湖周边为富水性含水岩组,地下水主要受大气降水补给,为降水-蒸发型;石嘴山市及银川市城市地区为较富水性含水岩组,居民用水较多,为开采型。

表 1 地下水位动态类型分类结果表
Tab. 1 Classification results of groundwater level dynamic type

类型		径流型	灌溉型	降水-蒸发型	开采型
孔数	潜水	10	25	11	7
(个)	承压水	13	9	—	2



1. 潜水径流型井;2. 潜水灌溉型井;3. 降水-蒸发型井;4. 潜水开采型井;5. 承压水径流型井;6. 承压水灌溉型井;7. 承压水开采型井;8. 地点;9. 银川平原边界;10. 多层含水层边界;11. 县界线;12. 河流;13. 湖泊;14. 径流型区域;15. 灌溉型区域;16. 降水-蒸发型区域;17. 开采型区域

图 1 银川平原地下水位动态类型分区图
Fig. 1 The zoning map of groundwater dynamic type in yinchuan plain

结合地下水位月尺度监测数据,通过年内地下水位动态变化分析,各类型水位变化类型趋势如图 2 所示,具体为径流型呈 M 型变化;灌溉型呈 W 型变化;降水-蒸发型呈 Δ 型变化;开采型呈 Z 型变化。

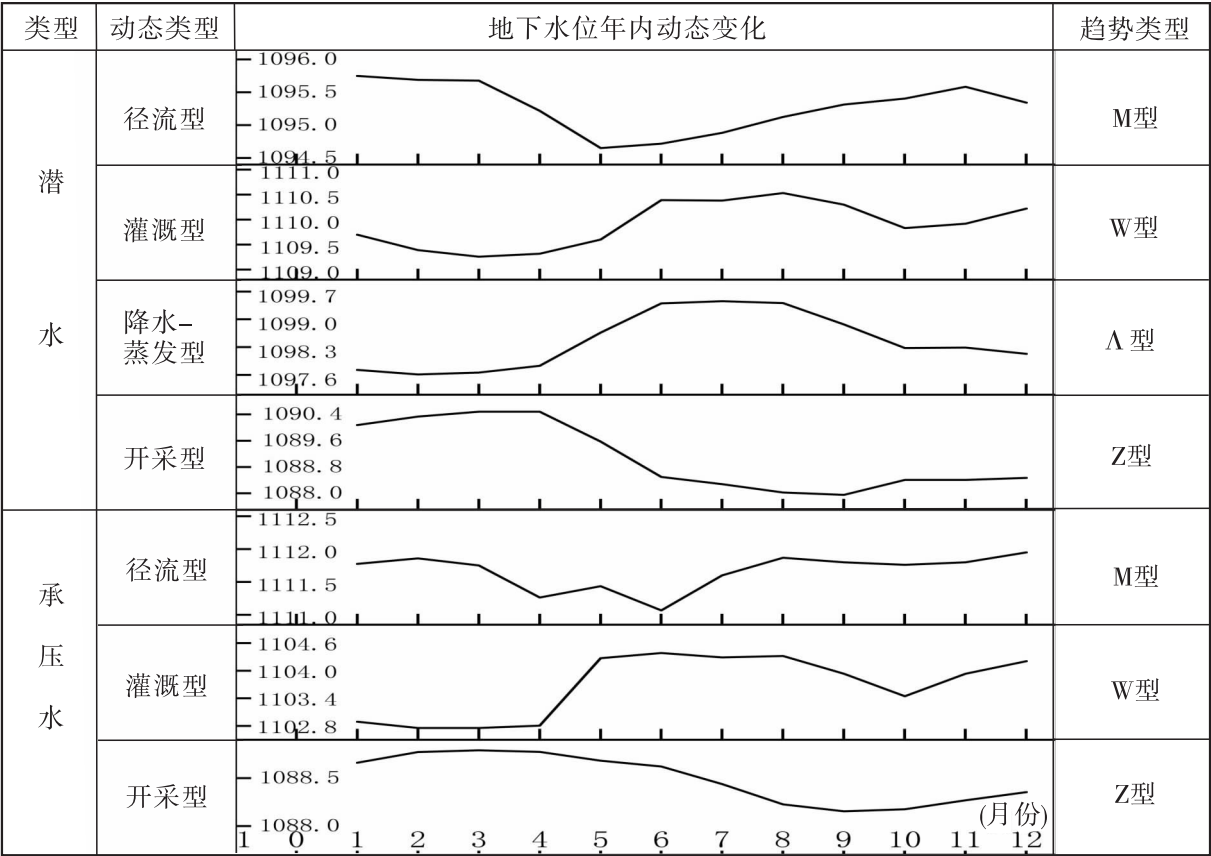


图 2 不同地下水位动态类型变化模式图

Fig. 2 Different dynamic type change models of groundwater level

3.2 时间尺度上地下水位变化特征分析

3.2.1 潜水径流型和承压水径流型(M 型)

主要分布于贺兰山东麓洪积倾斜平原,潜水主要受西部贺兰山区基岩裂隙水、沟谷潜水和洪水补给,水位埋深 1~30 m,年水位变幅 1~5 m,承压水主要受西侧单一潜水区补给水位埋深 2~40 m,年水位变幅 1~2.2 m。直接影响地下水位变化的因素为山前洪流和冰雪融水。贺兰山东麓山洪沟主要有苏峪口沟、大武口沟和汝箕沟,2013 年实测年洪水总量分别为 22.8 万 m³、394.3 万 m³、55.9 万 m³(冯丽媛等,2012);另外贺兰山在每年春季 2~3 月份冰雪消融对地下水有一定的补给作用。

研究选取大武口沟及其附近的长观孔进行分析,其位于石嘴山市大武口区城区,分析可知春季 2~3 月份,由于春季回暖冰雪融水对地下水有一定

的补给,4~7 月份,径流补给减少,水位降低,6 月份由于一次较小洪水,潜水位有所上升,由于潜水含水层的渗透阻力影响,承压水水位维持较低状态,7 月下旬一次洪流量约 383.8 万 m³ 的较大洪水,水位有明显抬升(潜水水位上升 0.35 m,承压水水位上升 0.20m),承压水且山前岩性颗粒较粗,地下水的响应短暂且迅速(图 3)。

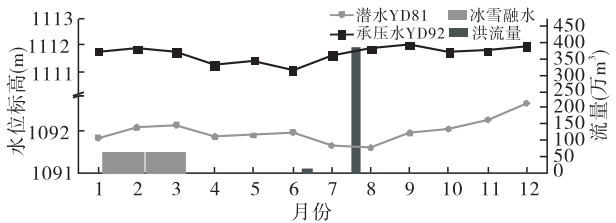


图 3 2013 年山前洪流及地下水动态图

Fig. 3 Piedmont torrent and groundwater dynamics in 2013

3.2.2 潜水灌溉型和承压水灌溉型(W 型)

主要分布于广阔的引黄灌区,包括冲洪积平原和冲湖积平原,由于地下水集流作用,湖泊也多聚集于此。潜水补给来源主要是渠系渗漏和田间灌溉渗入,水位埋深 1~6 m,年水位变幅 0.5~2.5 m,承压水补给来源主要是上层潜水,水位埋深 2~8 m,年水位变幅 0.5~2.2 m。每年的 4 月末至 9 月末进行夏秋灌,10 月末至 11 月末进行冬灌。农灌区地下水的主要补给来源为水渠渗漏补给和农业灌溉回渗,经计算,灌区内渠渗补给和农业灌溉回渗占总补给量的 84.85%,是地下水最主要的补给来源。银川平原内主要干渠有 11 个,2014 年银川平原引黄灌区各个干渠引水量为 0.605~9.901 亿 m³(魏礼宁等,2015),表 2 列出主要渠道引水状况,可以看出大部分渠道引水量都已超过 1 000 万 m³,且高于计划引水量。

表 2 2014 年银川平原主要渠引水量情况表
Tab. 2 Water diversion of main canals in yinchuan plain in 2014

供水渠道	长度(km)	计划引水量(万 m ³)	实际引水量(万 m ³)
唐徕渠	164.11	7 350	10 013
西干渠	21.85	1 050	2 816
汉延渠	96.67	890	783
惠农渠	157.40	760	0
秦渠	49.44	600	447
汉渠	35.23	430	320
马莲渠	11.64	1 300	1 200
泰民渠	28.00	1 350	1 269
大清渠	23.50	1 500	1 595
东干渠	54.42	2 450	7 166
总计	642.26	17 680	25 609

注:表格内容根据 2014 年宁夏水资源公报(魏礼宁等,2015)汇总。

研究通过调查计算得到银川平原 2014 年 4~9 月和 11 月单位面积灌溉量,分析可知由于定期灌溉影响,地下水也于每年的 4~9 月和 11 月有所升高,而 10 月和翌年 1~3 月水位降低,呈现规律性变化(图 4)。

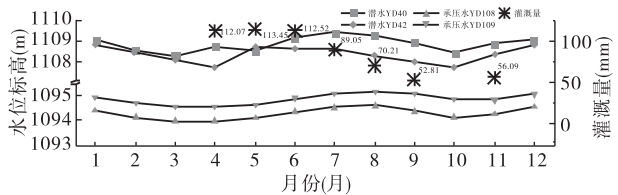


图 4 2014 年灌溉量及地下水动态图
Fig. 4 Irrigation volume and groundwater dynamics in 2014

3.2.3 潜水降水-蒸发型(Λ 型)

主要分布在第二农场渠沙丘地区及石嘴山市平罗县东部、银川林场、沙湖南部沙漠区。该区直接接受大气降水补给,水位埋深 1~5 m,年水位变幅小于 1.5 m。潜水水位动态主要受降水及蒸发的影响,每年的 2~4 月份为枯水季,降雨量较小,水位较低,6~8 月为丰水季,降雨量大,水位增高,9、10 月份秋季降雨量开始减少,水位逐渐降低。地下水位变化与降雨量时间变化存在明显一致性(图 5)。

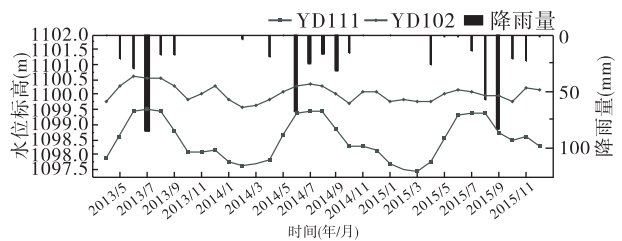


图 5 降雨量及地下水动态图
Fig. 5 Rainfall and groundwater dynamics

为准确分析银川平原降雨与地下水位关系,研究选取降水蒸发区内贺兰、平罗、沙湖、惠农 4 个气象站点, YD100、YD103、YD111、YD112、YD63、YD65,6 个地下水长观孔点 2013~2015 年的气象和水位数据,通过相关矩阵分析,发现各点地下水位变化均与降雨量存在一定的相关关系(图 6),为分析长观孔水位数据和与其相近的气象站的降雨量相关程度,引入确定调整系数,其公式为:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$R^2_{Adj} = 1 - \frac{n-1}{n-k-1}(1-R^2) \quad (2)$$

其中, R^2 为调整系数; n 是样本个数; $Adj. R^2$ 的数值越大,说明其拟合优度越好。

计算得其调整确定系数 $Adj. R^2$ 均在 0~0.3,说明银川平原气象要素在一定程度上影响着地下水位,在多种综合因素下,其影响程度一般,其中平罗县通伏乡一带(YD111 监测孔)地下水位对降雨响应最为显著(图 7)。

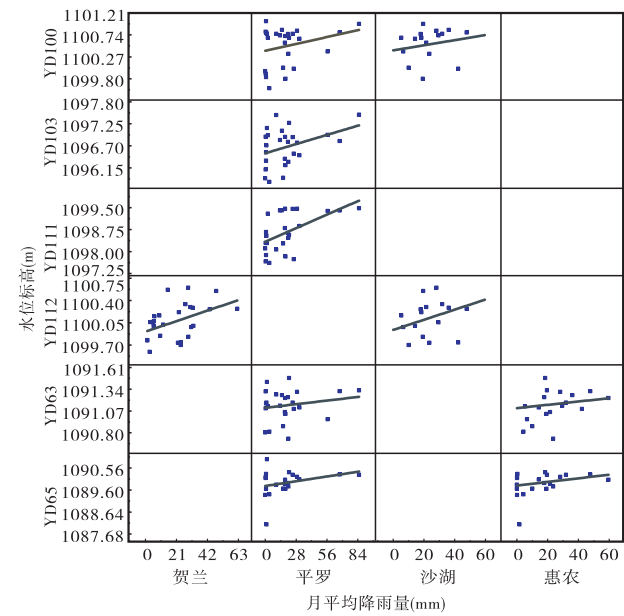


图 6 地下水位与降雨量关系矩阵图

Fig. 6 Distribution diagram of determination coefficient of groundwater level and rainfall adjustment

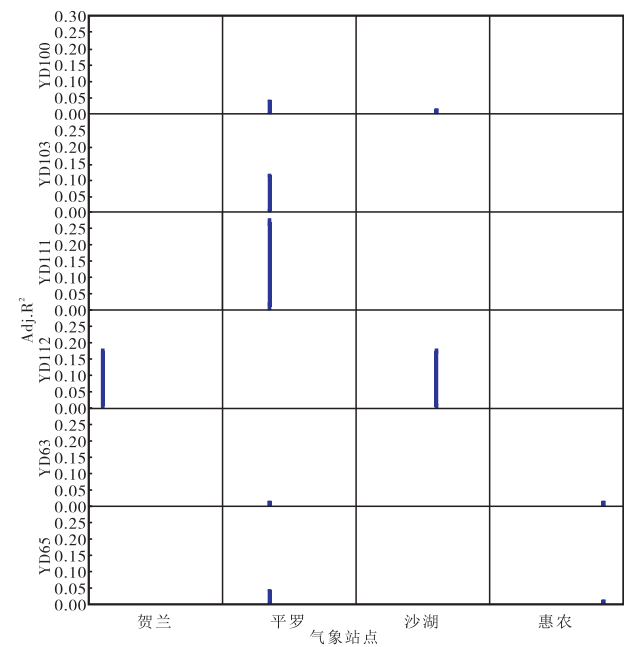


图 7 地下水位与降雨量调整确定系数分布图

Fig. 7 Matrix diagram of relationship between groundwater level and rainfall

3.2.4 潜水开采型和承压水开采型(Z型)

主要分布于银川市的部分地区以及石嘴山市大武口地区的洪积扇上,湖泊分布较多,受人为因素影响较为严重,潜水水位埋深为 1~8 m,年水位变幅

为 1~3 m,承压水水位埋深达 1~40 m,年水位变幅为 1~3 m。随着经济的发展和人民生活水平的不断提高,银川平原生活用水与工业用水量也随之增高,银川平原对于潜水的开采分布零散,主要是以小面积开采为主,在石嘴山市区和银川市地下水的开采量比较大。据统计,宁夏有 5 个超采区,总面积为 741 平方千米,其中,银川市 1 个超采区;石嘴山市 4 个超采区。银川市生活、工业用水主要开采第一层承压水,石嘴山市城市、生活、工业用水以山前第一潜水及第一承压水为主要开采层(王文科等, 2004)。由于人类活动影响强烈,夏季开采量较大,潜水位有所下降;承压水位有小幅下降,冬季开采量较小,由于灌溉区对冬灌的空间响应和地下水开采回渗补给作用,水位有所上升。总体上,两者均呈维持缓慢下降状态。

3.3 空间尺度上地下水位变化特征分析

为了更为准确地分析银川平原各地区地下水变化规律及其驱动因素,研究选取银川平原 2014 年丰水季与枯水季地下水位进行比较分析,图 8 为银川平原 2014 年丰枯水季潜水位、承压水位分布及其变化情况。

由于银川平原地貌类型从西呈东由山前洪积斜平原—冲洪积平原—河湖积平原变化,因此地下水动态类型自西向东呈径流型—开采型—灌溉型规律变化,且自西南向东北地下水位由高到低。

对于潜水:①银川平原西侧径流型区域潜水位呈现自西向东逐渐降低的趋势,由于此地靠近贺兰山山前,为冲洪积平原,地下水等水位线比较密集,水力梯度较大;银川平原东侧潜水位呈现自南向北逐渐降低的趋势,水力梯度较小。②银川平原黄河上游,地下水的补给主要为引黄灌溉入渗,区域的潜水位普遍较高,下游多城市聚集,地下水耗水较多,这就导致了在沿黄河河漫滩地带,水力交换模式自南向北由地下水补给河水变为河水补给地下水。③在石嘴山市、惠农县和永宁县东部的存在明显降落漏斗,这些地区的地下水动态类型属于灌溉型和开采型,由于人类活动的周期性影响,丰水季降落漏斗更为明显。

对于承压水:①银川平原承压水位总体呈现西南高北部低的趋势,西部为径流型区域,由于 3、4 月份的冰雪融水作用,枯水季水位相对于丰水季较高,而东部承压水动态类型多属于灌溉型,丰水季受夏

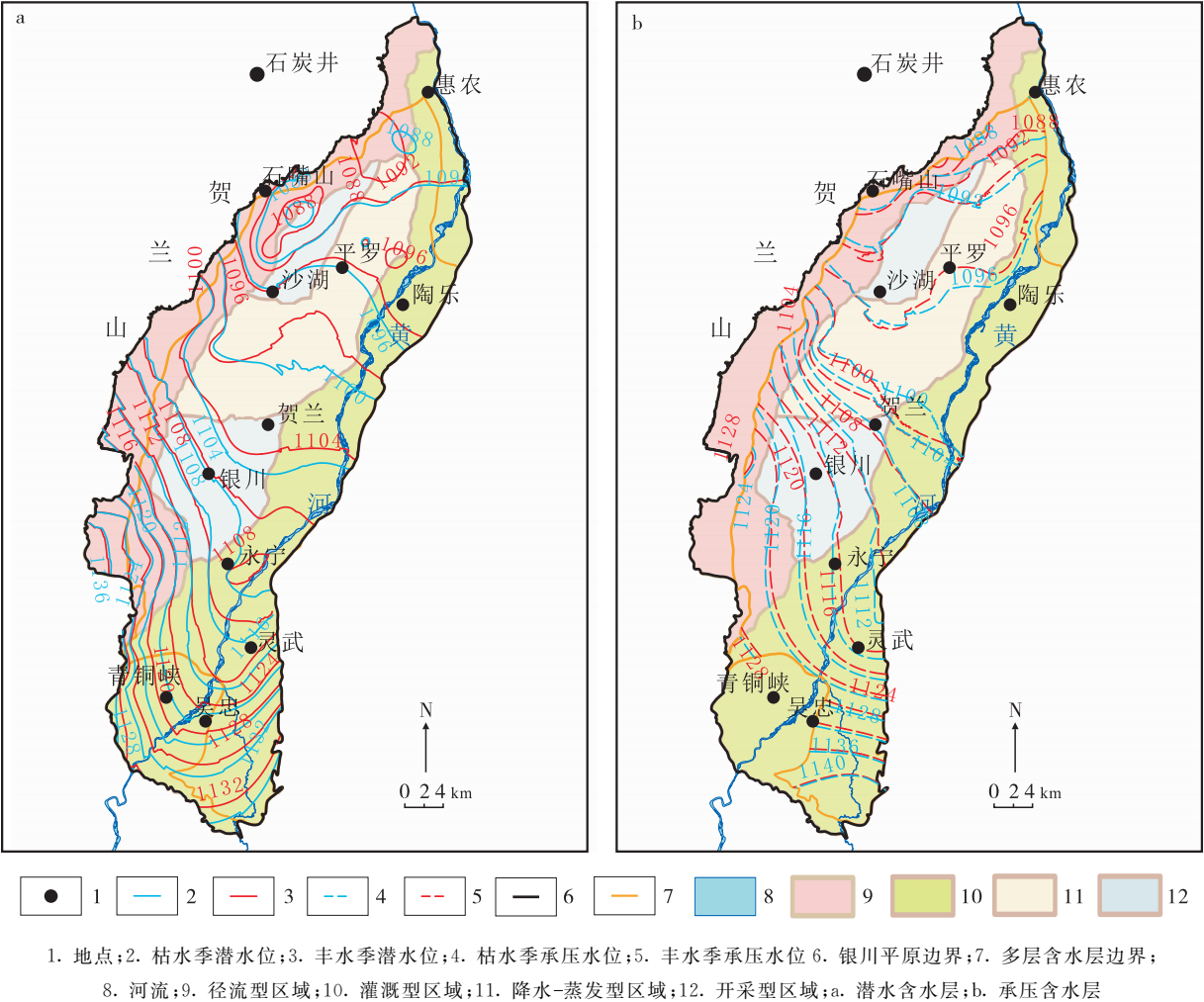


图 8 银川平原潜水和承压水流场图

Fig.8 Chart of submersible and artesian flow field in yinchuan plain

灌影响和降水作用,水位较枯水季高。②银川平原南部承压水等水位线较密集,水力梯度大,丰水季水位上升幅度较小,这可能与银川平原南部临近黄土高原,南部地形起伏更为明显有关。

3.4 综合分析

由以上分析可知,银川平原地下水动态变化类型主要受气象因素、地形因素、水文因素、人为因素的影响(表 3),径流型、灌溉型、降水蒸发型的变化趋势趋于稳定,而由于长期集中开采,开采型地下水位呈逐年下降趋势,并在石嘴山市、惠农县、银川市永宁县东部存在明显降落漏斗,因此对银川平原地下水的开采需采用零散分布的小面积开采,水位易下降区应减少开采或者不开采。为保持含水层承压性,要求水源地范围内最大水位下降速率不超过 1 m/a(徐映雪等,2015),根据不同丰、枯水季,开采

比例应进行适当调整,以提高水资源利用效率。

为分析不同开采量对银川平原地下水位的影响,确定最优开采量,以银川市北郊水源地为例,利用 Visual modflow 进行不同开采量的预测。以阅海湖区域为模拟区,结合 2014 年银川市地下水位监测资料及地下水开采情况,建立三维非稳定地下水流数值模型,模型的识别验证如图 9 所示,观测孔地下水位模拟值与实测值变化趋势高度一致,可以判定该模型预测地下水位变化较为合理。

银川市 2014 年的地下水资源实际开采量为 $1.7\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$,夏季开采量占 60%,冬季占 5%,在此开采量下,地下水位下降 0.712 m/a,且水源地出现明显降落漏斗,通过预测模拟,将夏季开采水量分别调控到全年的 55%、50%、45%、40%、35%,并将开采量分配到冬季进行模拟预测,发现当夏季开采

表 3 银川平原地下水动态特征及其成因表
Tab. 3 Dynamic and its genesis of groundwater in yinchuan plain

类 型		特 征	主要因素	次要因素
潜 水	径流型	时间尺度	2~3 月小幅上升,4~7 月水位下降	水文因素
		空间尺度	等水位线密集,水力梯度大	气象因素
	灌溉型	时间尺度	4~9 月和 11 月 2 次高水位,2~4 月降低	农业灌溉因素
		空间尺度	地下水补给黄河	水文因素
	降水-蒸发型	时间尺度	6~8 月高水位,2~3 月、9~10 月低水位	气象因素
		空间尺度		
	开采型	时间尺度	6~9 月低水位	人工开采因素
		空间尺度	黄河补给地下水,形成降落漏斗	水文因素
	径流型	时间尺度	4~7 月水位下降,2~3 月水位小幅上升	水文因素
		空间尺度	等水位线密集,水力梯度大	地形因素
承压水	灌溉型	时间尺度	4 月~9 月和 11 月水位 2 次上升	农业灌溉因素
		空间尺度	流线较稀疏	地形因素
	开采型	时间尺度	4~9 月水位有下降趋势,11 月水位上升	人工开采因素
		空间尺度	无明显降落漏斗	人工开采因素

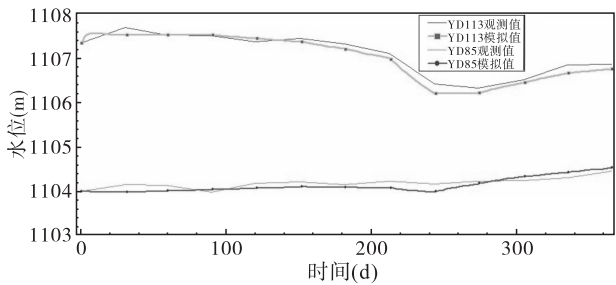


图 9 观测孔水位拟合图

Fig. 9 Fitting diagram of observation hole water level

量调控到 50%以下时,降落漏斗开始消失(图 10),当夏季开采量为 45%时,一年内水位降幅最小,降幅为 0.480 m/a,与实际开采情况相比减缓了 0.232 m。因此,夏季开采全年的 45%~50%,冬季开采 15%~20%,可认为是银川平原最佳开采量。

4 结论

笔者以银川平原 77 个长观孔 2013~2015 年共 3 年的地下水位数据为依据,通过时间和空间尺度上的分析,得出如下结论。

(1)由于银川平原复杂的地理环境,其地下水位动态类型呈多样性,且不同类型在时间尺度上有明

显的的差异,概括为:径流型呈 M 型变化,灌溉型呈 W 型变化,降水-蒸发型呈 Δ 型变化,开采型呈 Z 型变化;4 种类型的变化类型分区也比较明显,其中人为影响地下水位动态类型区(灌溉型、开采型)分布面积最广,约占银川平原总面积的 1/2,人为影响类型为银川平原主要的地下水动态类型。

(2)通过 SPSS 分析,时间尺度上影响银川平原地下水位动态变化的主要因素为农业灌溉因素,而随着城市范围的扩大,人类开采因素已成为控制因素,如果不加以调控,将成为主导因素;空间尺度上影响银川平原地下水位动态变化的主要因素为地形因素,地势上的南高北低,导致银川平原西南水势比北东高,而地下水动态类型自西(贺兰山东麓)向东(黄河河漫滩)也呈现径流型—开采型—灌溉型的规律性变化。

(3)在石嘴山、银川一些城市地区由于地下水的大量开采,导致地下水位持续降低,形成多处明显降落漏斗,模拟显示当控制水源地夏季开采量为全年的 45%~50%,冬季为全年的 15%~20%,地下水位下降最为缓慢,下降幅度为 0.480 m/a,在水源地允许开采范围。因此对于供水水源地地区,在保证生活用水范围内,为有效防止因对地下水开采引起的一系列问题,应控制夏季开采量为全年的 45%~

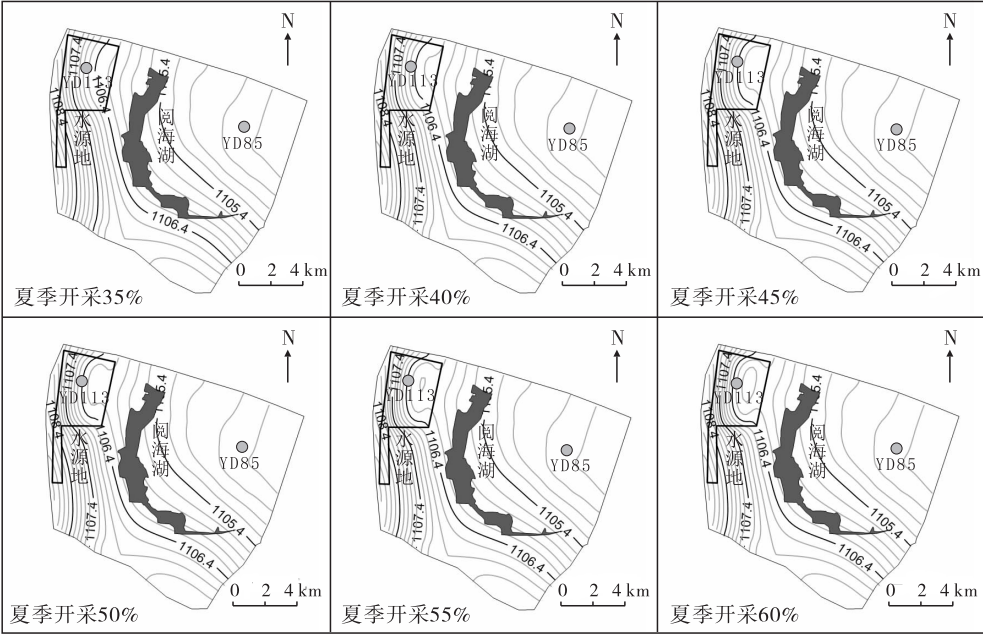


图 10 不同开采模式下潜水水流场变化图

Fig. 10 Variation of submersible flow field in different mining modes

50%，冬季为全年的 15%~20%。对于整个银川平原，从原因上入手，对地下水动态变化规律进行分类分析，有针对性地采取措施，如按地下水动态类型分区规划灌溉区与水源池、合理分配开采时间和开采量，对解决或缓解宁夏地区由于地下水位变动引起的生态地质问题和环境问题有着十分重要的意义。

参考文献(References):

李琦. 渭河流域地下水对气候变化的响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.

LI Qi. Mechanism of groundwater response to climate change in Weihe River basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

赵建忠, 魏莉莉, 赵玉苹, 等. 黑河流域地下水与地表水转化研究进展[J]. 西北地质, 2010, 43(03): 120-126.

ZHAO Jianzhong, WEI Lili, ZHAO Yuping, et al. Surface Water and Groundwater Transformation Research in Heihe River Basin[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(03): 120-126.

马雄德, 范立民, 严戈, 等. 植被对矿区地下水位变化响应研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(01): 44-49.

MA Xiongde, FAN Limin, YAN Ge, et al. Vegetation responses to groundwater level change in mining Area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(01): 44-49.

古力米热·哈那提, 王光焰. 干旱区间歇性生态输水对地下水位与植被的影响机理研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41

(04): 726-733.

HANATI Gulimire, WANG Guangyan. Influence Mechanism of intermittent ecological water conveyance on groundwater level and vegetation in arid land[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(04): 726-733.

杨胜科, 王文科, 李翔, 等. 水溶性污染物在土壤中转化的原位实验方法[J]. 西北地质, 2002, 35(02): 20-23.

YANG Shengke, WANG Wenke, LI Xiang, et al. A site experimental method to study the transfer and transform of water-soluble contamination in soil[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(02): 20-23.

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[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 462-472.

WANG Shiqin, SONG Xianfang, WANG Qinxue, et al. Dynamic Features of Shallow Groundwater in North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 462-472.

黄金廷, 侯光才, 尹立河, 等. 干旱半干旱区天然植被的地下水水文生态响应研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(5): 788-793.

HUANG Jinting, HOU Guangcai, YIN Lihe, et al. Ecohydrological response of natural vegetation in arid and semi-arid area: A review[J]. Arid Area Geography, 2011, 34(5): 788-793.

杨泽元, 王文科. 干旱半干旱区地下水引起的生态效应的研究现状与发展趋势[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 739-745.

YANG Zeyuan, WANG Wenke. Research Status and Development Trend of Ecological Effects Caused by Ground-

- water in Arid and Semi-arid Areas[J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(5):739-745.
- 胡海华,丁宏伟,贺兵英.石羊河流域中下游近 40a 地下水位动态特征分析[J]. *西北地质*, 2016, 49(03):164-174.
- HU Haihua, DING Hongwei, HE Bingying. Dynamic Variation of Groundwater Level in the Middlelower Reaches of Shiyanghe River Basin for Nearly 40 Years [J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(03):164-174.
- 于艳青,张作辰.宁夏河套平原地下水资源开发潜力分析[J]. *水文地质工程地质*, 2002, (02):56-58.
- YU Yanqing, ZHANG Zuochen. Analysis on groundwater resources exploitation potentiality in Hetao plain of Ning xia[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002, (02):56-58.
- 王文科,韩锦萍,赵彦琦,等.银川平原水资源优化配置研究[J]. *资源科学*, 2004, (02):36-45.
- WANG Wenke, HAN Jinping, ZHAO Yanqi, et al. Optimal Allocation of Water Resources in Yinchuan Plain [J]. *Resource Science*, 2004, (02):36-45.
- 王尧,张茂省,杨建锋.中国地质环境脆弱性评价[J]. *西北地质*, 2019, 52(02):198-206.
- WANG Yao, ZHANG Maosheng, YANG Jianfeng. Evaluation Research on the Fragility of Geological Environment in China [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52 (02):198-206.
- 王改平,吴学华,杨建,等.银川平原与地下水相关的生态环境及演变[J]. *宁夏工程技术*, 2006, (03):226-229.
- WANG Gaiping, WU Xuehua, YANG Jian, et al. The ecological environment and evolution of groundwater in Yinchuan plain [J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2006, (03):226-229.
- 魏建成.银川平原地下水位动态影响因素及变化类型分析[J]. *宁夏工程技术*, 2013, 12(03):209-211.
- WEI Jiancheng. The groundwater level dynamic effect factors and changing types of Yinchuan plain [J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2013, 12(03):209-211.
- 王枫.银川平原地下水动态特征及地下水年龄分布特征研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2017.
- WANG Feng. Study on Dynamic Characteristics of Groundwater and Age Distribution of Groundwater in Yinchuan Plain [D]. Beijing:China University of Geosciences, 2017.
- 董佩,王旭升. MODFLOW 模拟自由面渗流的应用与讨论[J]. *工程勘察*, 2009, 37(07):27-30.
- DONG Pei, WANG Xusheng. Application and discussion of MODFLOW's simulation to the seepage of free surface [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37 (07):27-30.
- 冯丽媛,段汉明.银川平原人口空间分布研究[J]. *西北人口*, 2012, 33(05):90-94.
- FENG Liyuan, DUAN Hanming. Spatial Distribution of Population in Yinchuan Plain [J]. *Northwest Population Journal*, 2012, 33(05):90-94.
- 魏礼宁,张学文,陈玉春,等. 2014 宁夏水资源公报[R]. 银川:宁夏回族自治区水利厅, 2015.
- 徐映雪,邵景力,崔亚莉,等.银川平原地下水流模拟与地下水资源评价[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42 (03):7-12.
- XU Yingxue, SHAO Jingli, CUI Yali, et al. Application of groundwater modeling systems to the evaluation of groundwater resources in the Yinchuan Plain [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(03):7-12.
- GONGJinnan, WANG Kaiyun, Seppo Kellomäki, Modeling, et al. Modeling water table changes in boreal peatlands of Finland under changing climate conditions [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 244.
- JARKKOOKkonen, BJØRN Kløve. A conceptual and statistical approach for the analysis of climate impact on ground water table fluctuation patterns in cold conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 388.
- PHILIPPE Marcotte, VINCENT Roy, ANDRÉP. Plamondon, Isabelle Auger. Ten-year water table recovery after clearcutting and draining boreal forested wetlands of eastern Canada [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22.
- MARINI L, NASCIBENE J, SCOTTON M, et al. Hydrochemistry, water table depth and related distribution Patterns of vascular plants in a mixed mire [J]. *Plant Biosystems An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2008, 142(1):79-86.
- BHULLAR Gurbir S, IRAVANI Majid, EDWARDS Peter J. Olde Venterink Harry. Methane transport and emissions from soil as affected by water table and vascular plants. [J]. *BMC Ecology*, 2013, 13.
- P. BONNAUD, Ph. SANTENOISE, D. Tisserand, et al. Impact of compaction on two sensitive forest soils in Lorraine (France) assessed by the changes occurring in the perched water table [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 437.
- SRDAN Kostić, MILAN Stojković, IVA Guranov, Nebojša Vasović. Revealing the background of groundwater level dynamics: contributing factors, complex modeling and engineering applications [J]. *Chaos, Solitons and Fractals: the interdisciplinary journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena*, 2019, 127.
- LUMINDA Niroshana Gunawardhana, SO Kazama. Statistical and numerical analyses of the influence of climate variability on aquifer water levels and groundwater temperatures: The impacts of climate change on aquifer thermal regimes [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 86-87.