

北京市昌平区不同层位地下水埋深时空动态特征 及其对降水的响应

管凝¹, 毕华兴^{1,2,3,4,5*}, 张清涛⁶, 李粟粟⁶, 焦振寰⁶

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.林木资源高效生产全国重点实验室,
北京 100083; 3.水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083;
4.北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083; 5.林业生态工程教育部工程研究中心,
北京 100083; 6.北京市昌平区水文水质监测中心, 北京 102200)

摘要:【目的】探究北京市昌平区不同层位地下水埋深时空动态特征及其对降水的响应。【方法】基于 2021—2022 年北京市昌平区 98 处地下水自动监测井(浅层井 75 处、深层井 16 处、基岩井 7 处)的实测地下水埋深数据及降水观测数据, 结合克里金插值法和 Cross-correlation 方法, 分析了昌平区不同层位地下水埋深的空间分布、时间动态变化及其对降水的响应。【结果】昌平区地下水埋深的空间分布整体为东南部较高, 西北部较低。浅层地下水埋深在 2 个观测年度均存在 1 处降落漏斗, 深层地下水在 2021 年存在 1 处降落漏斗, 但于 2022 年消失, 基岩地下水埋深无降落漏斗。深层地下水埋深分布的空间变异性明显高于浅层和基岩层; 浅层地下水和深层地下水在各月呈同步增长或下降趋势, 埋深最大值分别出现在 2021 年 6 月和 2022 年 5 月, 最小值出现在 2021 年 12 月和 2022 年 12 月。基岩地下水埋深的月变化规律与浅层及深层相比具有明显差异, 月尺度上不同层位地下水埋深整体表现为基岩层>深层>浅层。【结论】2021 年的地下水埋深整体高于 2022 年, 这与降水量的年际变化有关; 不同层位地下水对月降水量的响应不同, 其中基岩地下水埋深对降水的响应存在明显的时滞性, 滞后时间为 6 个月; 而浅层和深层地下水无明显时滞性。

关键词: 昌平区; 地下水; 降水; 响应时滞性

中图分类号: P641

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023220

管凝, 毕华兴, 张清涛, 等. 北京市昌平区不同层位地下水埋深时空动态特征及其对降水的响应[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 103-108.

GUAN Ning, BI Huaxing, ZHANG Qingtao, et al. Spatial and Temporal Dynamic Characteristics of Groundwater Burial Depth at Different Levels and Its Response to Precipitation in Changping District, Beijing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 103-108.

0 引言

【研究意义】地下水是水资源的重要组成部分, 地下水安全对社会生产和生态建设具有重要意义^[1]。人类活动的加剧使地下水资源管理面临巨大挑战^[2]。我国地下水超采区主要分布在华北平原、三江平原和松嫩平原, 其中华北平原地下水超采问题最为严重, 在气候变化和人类活动的双重影响下, 华北平原地下水的循环方式和利用规模发生了巨大变化, 地下水水位持续下降并逐渐形成降落漏斗^[3]。

随着国家地下水监测工程和北京市平原区地下

水监测工程的实施, 地下水动态变化规律得到了更深入的研究。昌平区位于北京市西北部, 是华北平原地下水的重要补给区^[4]。目前, 关于昌平区地下水分布、变化和影响因素的研究较少, 导致对该地区地下水动态变化规律的认识十分有限。

【研究进展】Balacco 等^[5]基于克里金差值法对地下水硝酸盐污染的时空演变进行了评价; Zhang 等^[6]基于地理信息系统(GIS)的空间分析技术, 评估了半干旱地区淡水生产含水层的地下水质量; Yan 等^[7]通过 GIS、遥感(RS)和地统计学方法分析了三工河流域的地下水变化。【切入点】然而, 关于地下水时空分布及动态变化的研究往往未对不同层位(含水层)的地下水进行区分。不同含水层的补给、演化和水化学过程存在差异, 如浅层地下水的补给源十分复杂, 而深层地下水主要受浅层地下水和地表水的补给^[8]; 浅层地下水更新能力较强, 深层地下水更新能力次之^[9];

收稿日期: 2023-05-19 修回日期: 2023-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243202)

作者简介: 管凝(1998-), 女。博士研究生, 主要研究方向为水土保持与林业生态工程。E-mail: guanning2020@bjfu.edu.cn

通信作者: 毕华兴(1969-), 男。教授, 博士生导师, 主要研究方向为水土保持与林业生态工程。E-mail: bixh@bjfu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

浅层地下水的水化学类型复杂,而深层地下水相对单一^[10]。因此,将地下水区分为不同层位进行监测和研究,有助于进一步认识地下水变化过程。

此外,明确各影响因素对地下水埋深变化的贡献是调控地下水的關鍵。在众多因子中,降水能够直接影响土壤水的分布,从而影响水分入渗和补给过程,使地下水埋深呈不同尺度的时空分布特征^[11]。

【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究基于2021—2022年北京市昌平区98处地下水自动监测井的实测地下水埋深数据及降水观测数据,结合地理信息系统分析昌平区浅层地下水、深层地下水和基岩地下水3种不同类型含水层的地下水分布情况及埋深变化,同时结合降水数据,分析地下水埋深对降水的响应,研究结果可为认识昌平区不同层位地下水的特征提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昌平区面积为1343.5 km²,北与延庆区和怀柔区相接,南与朝阳区和海淀区毗邻,西与门头沟相连,东与顺义接壤。昌平区的山区面积和平原面积分别占全区总面积的59%和41%。平原区的地下水补给主要有降水入渗、山区侧向流入、河流渗漏及灌溉补给,山区地下水主要为降水入渗补给。地下水排泄方式有人工开采和自然排泄,其中人工开采包括水源地开采、城镇工业开采和农业开采;自然排泄包括地下水的溢出、蒸发及向下游的侧向流出^[12]。

1.2 监测点位布设

依托国家地下水监测工程(北京部分)和北京市地下水自动监测井建设工程,在昌平区布设了98处地下水监测井,包括浅层、深层和基岩3种不同地下水监测层位,监测井数量分别为75、16和7(图1),地下水埋深根据实测监测数据分析得出,同步进行降水量观测。

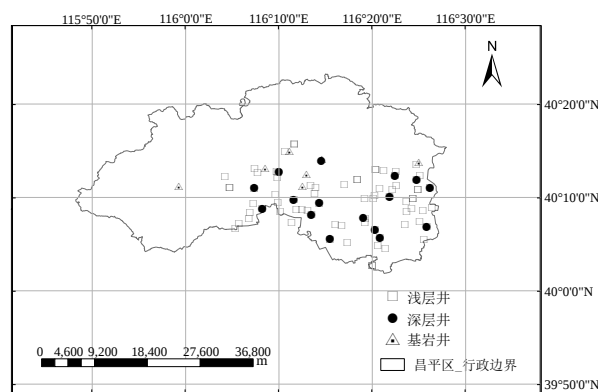


图1 地下水监测井分布

Fig.1 Groundwater monitoring wells distribution

1.3 研究方法

借助 ArcGIS 软件将各监测点的地理坐标和地下水埋深数据和降水数据集成到地理信息系统中,并应用克里金(Kriging)插值法分析地下水位埋深和降水量的变化,其原理详见文献[13]。

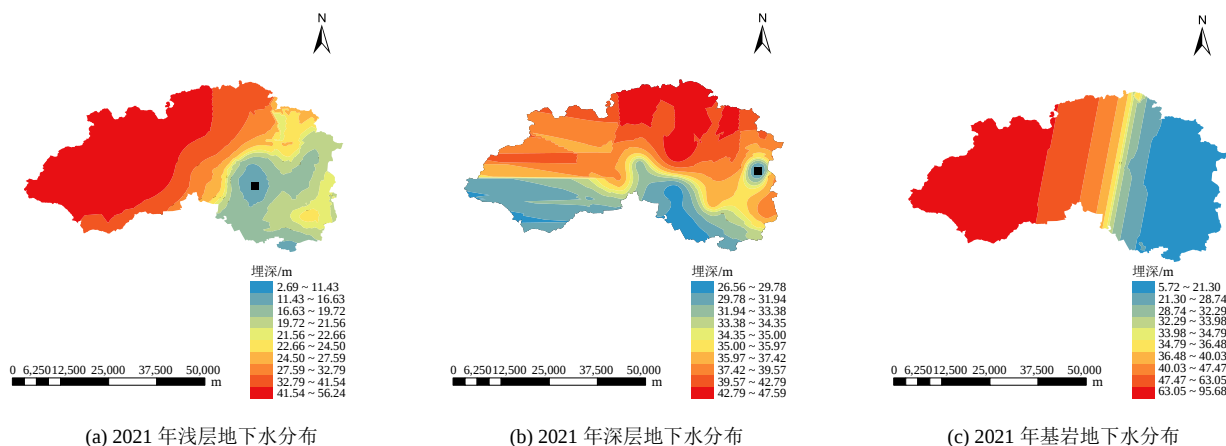
通过 Cross-correlation 法分析降水与地下水的时滞性,可以反映各层位地下水对降水输入的响应及其时间间隔,响应系数计算方法详见文献[14]。

2 结果与分析

2.1 不同层位地下水埋深的空间分布特征

由图2可知,昌平区2021—2022年的浅层地下水、深层地下水和基岩地下水埋深的分布具有一定差异。基岩地下水埋深呈由东到西逐渐升高的趋势。浅层地下水埋深呈由中部地区到周围地区逐渐升高的趋势;深层地下水埋深的分布相对来说最为斑块化,总体呈由南到北逐渐降低趋势。

昌平区浅层地下水埋深存在一处降落漏斗,位于昌平区中部,2021年漏斗中心埋深水位为11.43~16.63 m,2022年为10.33~15.23 m。深层地下水于2021年在昌平区南部出现一处高于海平面的降落漏斗,2022年该降落漏斗消失。基岩地下水埋深不存在降落漏斗。



(a) 2021年浅层地下水分

(b) 2021年深层地下水分

(c) 2021年基岩地下水分

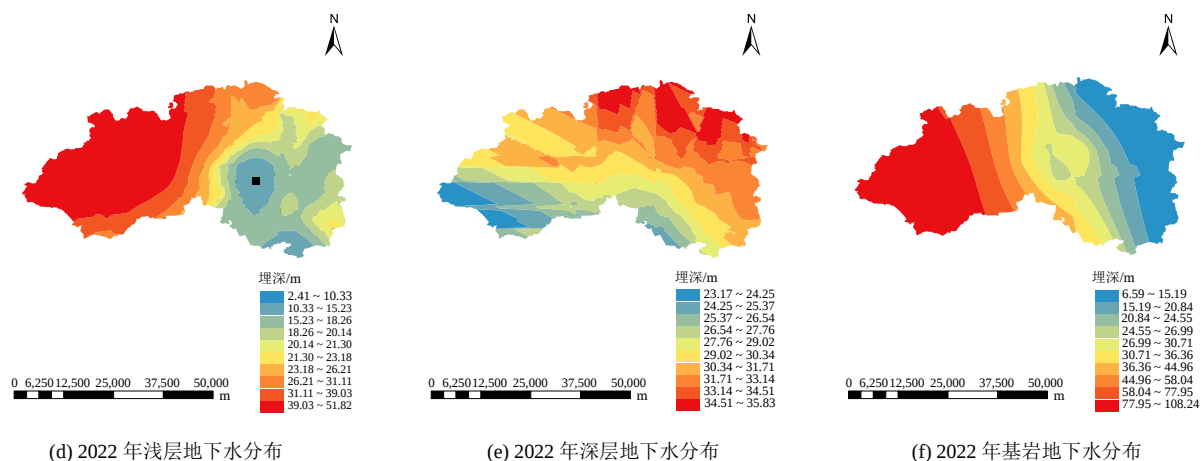


图2 昌平区 2021—2022 年地下水分布

Fig.2 Distribution of groundwater from 2021 to 2022

2.2 不同层位地下水位的时间变化特征

由表 1 可知, 4—7 月的地下水埋深相对较高, 浅层和深层地下水埋深的年最大值均出现在 2021 年 6 月和 2022 年 5 月, 最小值均出现在 2021 年 12 月和 2022 年 12 月, 二者在各月呈同步增长或下降趋势。基岩地下水埋深的年最大值出现在 2021 年 6 月和 2022 年 4 月, 最小值出现在 2021 年 12 月和 2022 年 2 月。2022 年昌平区地下水月变化整体较为平稳, 浅层地下水、深层地下水和基岩地下水的月变化绝对值分别在 0.07~0.86、0.21~1.37、0.02~1.9 m 之间波动, 最大变化值均不超过 2 m。2021 年地下水埋深月变化相对 2022 年更为剧烈, 浅层地下水、深层地下水和基岩地下水埋深的月变化绝对值分别在 0.08~2.16、0.31~2.03、0.24~2.9 m 之间波动。

通过不同层位地下水在年时间尺度上的变化可知, 2021 年地下水埋深整体高于 2022 年。浅层地下水和深层地下水在 2022 年各月的埋深均小于上年同期地下水埋深, 而基岩地下水 11 月和 12 月的埋深在 2022 年高于 2021 年。10 月前, 各月地下水埋深的年差值为基岩地下水>深层地下水>浅层地下水, 3 个层位地下水埋深的年插值最大月均为 6 月, 分别为 5.32 m (浅层地下水)、6.92 m (深层地下水) 和 10.87 m (基岩地下水), 年插值最小月均为 11 月, 分别为 1.58 m (浅层地下水)、2.50 m (深层地下水) 和 0.64 m (基岩地下水)。

2.3 地下水位对降水的响应

由图 3 可知, 2021—2022 年昌平区的年降水量呈东部地区较多、西部地区较少的分布特征, 其中 2021 年东北部降水最多, 西南部降水最少; 而 2022 年东南部降水最多, 西北部最少。通过比较各月的月均降水量可知, 2021 年的年降水总量为 934.2 mm, 明显高于 2022 年 (496 mm)。昌平区 2021—2022 年

降水主要集中在每年的 6—8 月, 其中 2021 年 7 月的降水量达到全年最高值 (441.0 mm); 2022 年的降水量同样在 7 月最多, 为 157.9 mm。2021 年的降水量在 3、7 月和 9 月出现局部波峰, 在 4 月和 8 月出现局部波谷; 2022 年的降水量在 3、7 月和 11 月出现局部波峰, 在 5 月和 10 月出现局部波谷。

表 1 2021—2022 年昌平区地下水月变化

Table 1 Monthly variation of groundwater depth in Changping from 2021 to 2022

年	月	浅层地下水		深层地下水		基岩地下水	
		埋深/ m	月变化/ m	埋深/ m	月变化/ m	埋深/ m	月变化/ m
2021	1	25.67	-	34.58	-	43.92	-
	2	25.33	-0.34	34.08	-0.5	43.73	-0.19
	3	25.50	0.17	34.54	0.46	43.97	0.24
	4	26.64	1.14	36.54	2.0	44.99	1.02
	5	27.37	0.73	37.6	1.06	45.87	0.88
	6	27.45	0.08	37.91	0.31	46.63	0.76
	7	25.29	-2.16	35.88	-2.03	43.89	-2.74
	8	24.31	-0.98	34.55	-1.33	40.99	-2.9
	9	23.60	-0.71	33.08	-1.47	38.53	-2.46
	10	22.88	-0.72	32.04	-1.04	37.12	-1.41
	11	22.21	-0.67	31.14	-0.90	36.01	-1.11
	12	21.87	-0.34	30.41	-0.73	35.56	-0.45
2022	1	21.27	-0.60	29.37	-1.04	34.44	-1.12
	2	21.06	-0.21	28.9	-0.47	34.18	-0.26
	3	21.13	0.07	29.11	0.21	36.08	1.90
	4	21.91	0.78	30.48	1.37	36.66	0.58
	5	22.64	0.73	31.76	1.28	36.47	-0.19
	6	22.13	-0.51	30.99	-0.77	35.76	-0.71
	7	21.65	-0.48	30.64	-0.35	35.84	0.08
	8	20.79	-0.86	29.51	-1.13	35.87	0.03
	9	21.24	0.45	29.87	0.36	36.14	0.27
	10	20.96	-0.28	29.32	-0.55	36.44	0.30
	11	20.63	-0.33	28.64	-0.68	36.65	0.21
	12	19.95	-0.68	27.64	-1.0	36.63	-0.02

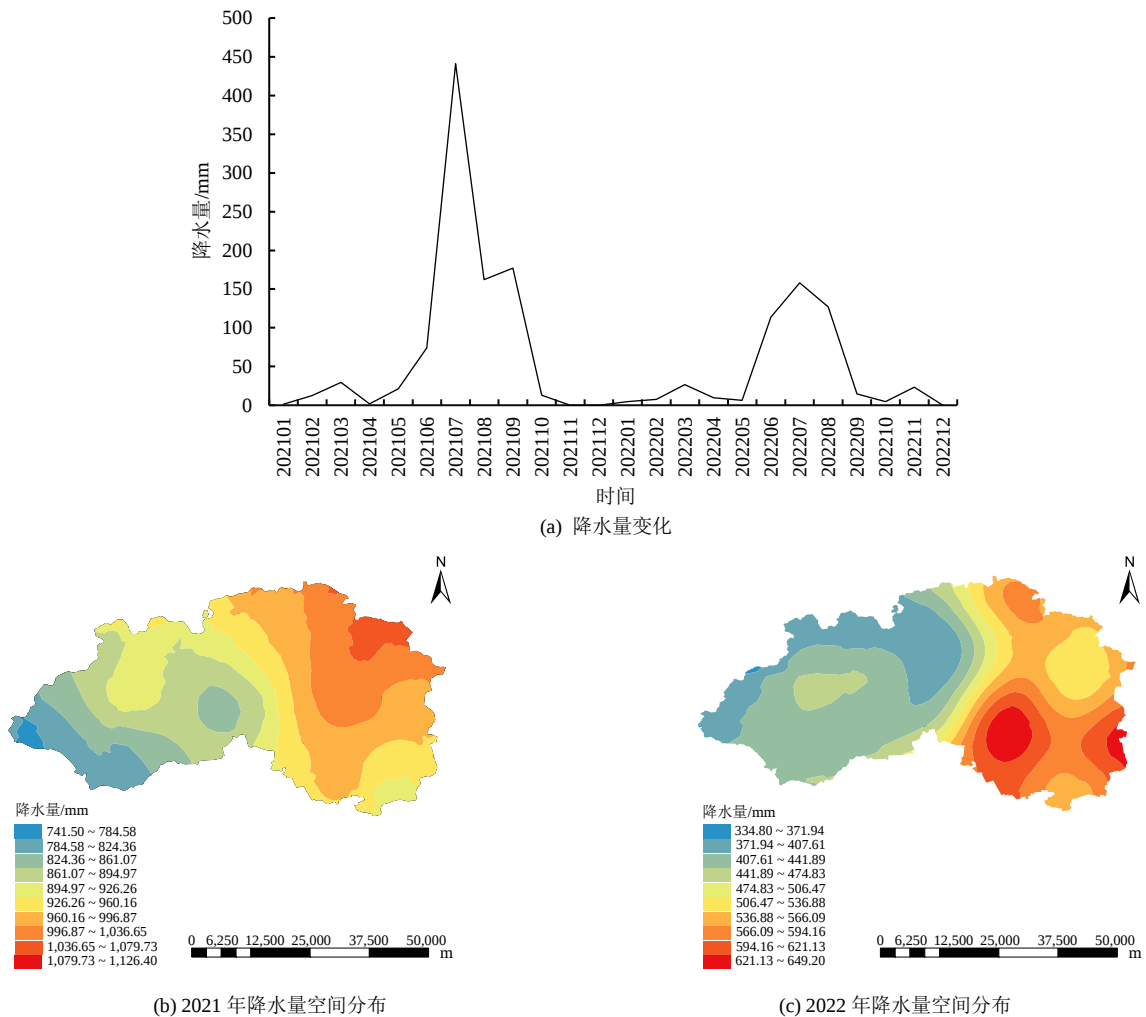


图3 昌平区降水量时空分布

Fig.3 Temporal and spatial distribution of precipitation in Changping

通过 Cross-correlation 法计算各月降水量与不同层位地下水埋深之间的响应系数 (r_m), 并计算大于 95%置信度下的浅层、深层和基岩地下水的响应系数 a 、 b 、 c ($a=0.23$, $b=0.50$, $c=0.76$)。由表 2 可知, 浅层地下水和深层地下水各月的埋深对月降水量的 r_m 均超过 95%置信度, 即浅层地下水和深层地下水对降水的响应在月时间尺度上的滞后性不明显, 当月的降水量能够及时补给到浅层和深层的地下含水层; 而基岩地下水埋深对降水的响应存在明显的时滞性, 除 2021 年的 1、4 月和 2022 年的 1 月外, 其余各月的 r_m 全部低于 95%置信度, 说明降水事件在月时间尺度上无法及时补给到基岩层。降水在 2021 年 7 月达到峰值, 随后基岩地下水 r_m 于 2022 年 1 月超过 95%置信度, 因此基岩地下水对降水响应的滞后时间为 6 个月。

3 讨论

由于受到多个影响因素的相互作用, 地下水埋深的时空分布及变化过程非常复杂。2021—2022 年, 昌平区地下水埋深分布在不同含水层间具有一定差异, 整体而言, 东南部的地下水埋深较浅, 西北部较

高。这可能是由于昌平区西北部主要为山区, 而人类活动频繁的城镇主要分布在东南部地区, 人类活动的增加会加大对地下水资源的开采强度; 此外, 随着城市化进程以及生产建设项目的不断推进, 地面不透水面积显著增加, 导致降水难以补给地下水^[15]。

2021—2022 年, 浅层地下水在昌平区中部地区存在一处降落漏斗, 深层地下水于 2021 年在南部地区存在一处降落漏斗, 该漏斗于 2022 年消失, 且这些降落漏斗未低于海平面, 全区无潜土层降落漏斗群。这是由于南水北调等引水工程的实施补充了地表水的供水量, 使得地下水埋深有所回升, 有效遏制了华北地区地下水持续降落^[16]。在月时间尺度上, 2021—2022 年昌平区各月的地下水埋深为基岩地下水埋深 > 深层地下水埋深 > 浅层地下水埋深, 这主要是因为越深层的地下水越难以被开采和利用。浅层地下水和深层地下水埋深的月变化趋势相似, 而基岩层略有差别, 这可能是因为层间越流以深层承压水补给浅层水为主, 因此深层地下水的增多或减少与浅层地下水息息相关^[17]。在年时间尺度上, 与 2021 年相比, 2022 年的地下水埋深整体降低, 2022 年昌平区降水量为 496.0 mm, 比

2021 年的 934.2 mm 少 438.2 mm (88%)，这可能是 2022 年地下水埋深相比 2021 年有所降低的主要原因。

基岩地下水埋深对降水的响应存在滞后现象，滞后时间为 6 个月。研究发现，随着地下水埋深的增加，地下水对降水响应的滞后时间增加^[18]。降水以活塞流下渗方式补给地下水的的时间为 167~834 a，说明地下水的补给可能更多地来自深层土壤水，而非降水^[19]。降水渗入土壤后能够以优先流的形式快速补给地下水^[20]。地下水的补给及埋深动态变化十分复杂，仍需深入研究地下水补给机制，为水资源开发和管理提供依据。

表 2 地下水-降水响应系数 r_m

时间		浅层	深层	基岩层
年	月	r_m		
2021	1	0.67	0.81	0.87
	2	0.91	0.92	0.75
	3	0.90	0.92	0.73
	4	0.90	0.90	0.81
	5	0.87	0.90	0.76
	6	0.84	0.90	0.74
	7	0.89	0.89	0.74
	8	0.81	0.91	0.53
	9	0.91	0.92	0.70
	10	0.88	0.91	0.74
	11	-	-	-
	12	-	-	-
2022	1	0.88	0.90	0.82
	2	0.91	0.89	0.55
	3	0.91	0.92	0.71
	4	0.89	0.92	0.73
	5	0.88	0.92	0.69
	6	0.85	0.89	0.60
	7	0.85	0.91	0.59
	8	0.87	0.92	0.68
	9	0.71	0.84	0.46
	10	0.84	0.82	0.57
	11	0.87	0.92	0.56
	12	-	-	-

4 结 论

昌平区地下水埋深的空间分布整体为东南部较高，西北部较低。浅层地下水埋深在 2 个观测年度均存在一处降落漏斗，深层地下水在 2021 年存在一处降落漏斗，但于 2022 年消失，基岩地下水埋深无降落漏斗。

深层地下水埋深分布的空间变异性明显高于浅层和基岩层；浅层地下水和深层地下水在各月呈同步增长或下降趋势，埋深最大值分别出现在 2021 年 6 月和 2022 年 5 月，最小值分别出现在 2021 年 12 月和 2022 年 12 月。

基岩地下水埋深的月变化规律与浅层及深层相比具有明显差异，月尺度上不同层位地下水埋深整体表现为基岩层>深层>浅层。

2021 年的地下水埋深整体高于 2022 年，这与降水量的年际变化有关；不同层位地下水对月降水量的响应不同，其中基岩地下水埋深对降水的响应存在明显的时滞性，滞后时间为 6 个月；而浅层和深层地下水无明显时滞性。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献：

- [1] WANG Y X, ZHENG C M, MA R. Review: Safe and sustainable groundwater supply in China[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1 301-1 324.
- [2] 杨鹏, 张寿川, 郭本力, 等. 日照地区不同类型含水层地下水位多年动态变化特征及影响因素[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版): 1-14[2024-01-05]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220322>.
- [3] 曹庆一, 陈卓, 梁季月, 等. 京津冀平原区地下潜水位降落漏斗现状分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(S2): 66-68.
- [4] 孙春媛, 刘波, 赵红磊, 等. 昌平平原区浅层地下水化学特征及水质评价[J]. 北京水务, 2022(3): 43-47.
- [5] BALACCO G, FIORESE G D, ALFIO M R. Assessment of groundwater nitrate pollution using the Indicator Kriging approach[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2023, 21: 100 920.
- [6] ZHANG Q, ZHOU B H, DONG F, et al. Spatial variability of groundwater quality for freshwater production in a semi-arid area[J]. Water, 2021, 13(21): 3 024.
- [7] YAN J F, CHEN X, LUO G P, et al. Temporal and spatial variability response of groundwater level to land use/land cover change in oases of arid areas[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(S1): 51-59.
- [8] 孙龙, 刘廷玺, 段利民, 等. 矿区流域不同水体同位素时空特征及水循环指示意义[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 805-815.
- [9] 王文博. 基于铍和氢氧同位素的敦煌盆地地下水演化与补给分析[J]. 地下水, 2022, 44(5): 77-79.
- [10] 刘心彪, 周斌, 魏玉涛. 基于环境同位素的陇东盆地地下水分析[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6): 804-810.
- [11] 鞠琴, 刘小妮, 刘智天, 等. 淮北平原地下水埋深变化对气候变化的响应及预测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 136-145.
- [12] 张国华, 瓮耐义, 王丽娟, 等. 昌平区地下水位变化特征分析[J]. 北京水务, 2021(2): 25-29.
- [13] WU X F, LIN Q Z, LIN W, et al. A Kriging model-based evolutionary algorithm with support vector machine for dynamic multimodal optimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 122: 106 039.
- [14] 任永强, 宫辉力, 潘云. 北京怀柔应急地下水源地降水入渗补给时滞性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 93-96, 136.
- [15] 王铁生, 武珂, 王志瑾, 等. 基于多光谱影像的伪绿化率对地下水影响研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(6): 60-62, 67.
- [16] 雷坤超. 南水北调前后北京平原区地下水和地面沉降演变特征[J/OL]. 地质学报: 1-20[2024-01-05]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023013>.
- [17] 聂振龙, 郭占荣, 李惠娣. 西北内陆盆地典型区开采条件下不同层位地下水互动关系[J]. 水文地质工程地质, 2002(1): 38-41.
- [18] 孙继能, 王万洲, 燕鑫, 等. 黄土区长武塬地下水埋深动态特征及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 90-97.
- [19] HUANG T M, MA B Q, PANG Z H, et al. How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers? Evidence from multiple environmental tracers[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124 532.
- [20] ZHANG Y H, ZHANG M X, NIU J Z, et al. The preferential flow of soil: A widespread phenomenon in pedological perspectives[J]. Eurasian Soil Science, 2016, 49(6): 661-672.

Spatial and Temporal Dynamic Characteristics of Groundwater Burial Depth at Different Levels and Its Response to Precipitation in Changping District, Beijing

GUAN Ning¹, BI Huaxing^{1,2,3,4,5*}, ZHANG Qingtao⁶, LI Susu⁶, JIAO Zhenhuan⁶

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of State Forestry and Grass Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China; 4. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China; 5. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 6. Changping Hydrology and Water Quality Monitoring Center, Beijing 102200, China)

Abstract: **【Objective】** To explore the temporal and spatial dynamic characteristics of groundwater depth at different levels and its response to precipitation in Changping District, Beijing. **【Method】** Based on the measured groundwater depth data and precipitation observation data from 98 automatic groundwater monitoring Wells (75 shallow Wells, 16 deep Wells, and 7 bedrock Wells) in Changping District, Beijing from 2021 to 2022, combined with Kriging interpolation method and cross-correlation method, The spatial distribution, temporal dynamic change of groundwater depth and its response to precipitation at different levels in Changping District are analyzed. **【Result】** The spatial distribution of groundwater depth in Changping region was higher in the southeast and lower in the northwest. In shallow groundwater depth, there was a descending funnel in both observation years; in deep groundwater, there was a descending funnel in 2021, but it disappeared in 2022; in bedrock groundwater depth, there was no descending funnel. The spatial variability of buried depth distribution of deep groundwater is obviously higher than that of shallow and bedrock layers. The shallow groundwater and deep groundwater showed a simultaneous increase or decrease trend in each month, with the maximum buried depth appearing in June 2021 and May 2022, and the minimum buried depth appearing in December 2021 and December 2022, respectively. The monthly variation of groundwater depth in bedrock is obviously different from that in shallow layer and deep layer. The overall variation of groundwater depth in different layers on the monthly scale is bedrock layer > deep layer > shallow layer. **【Conclusion】** The overall groundwater depth in 2021 is higher than that in 2022, which is related to the inter-annual variation of precipitation. The response of groundwater to monthly precipitation is different in different layers, and the response of groundwater depth of bedrock to precipitation has an obvious lag time of 6 months. There is no obvious time lag between shallow and deep groundwater.

Key words: Changping District; groundwater; precipitation; response time lag

责任编辑: 韩 洋