

科尔沁沙地地下水埋深变化趋势及驱动机制

郎明翰¹, 张学利¹, 张诗行¹, 凡胜豪², 张日升¹

(1. 辽宁省沙地治理与利用研究所, 辽宁章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测
研究站, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁省水利事务服务中心, 沈阳 110003)

摘要: [目的] 为深入了解沙地樟子松人工林地下水变化规律及气候变化、人类活动对其驱动机制。[方法] 以沙地樟子松人工林 2018—2023 年地下水埋深为研究对象, 沙地草地地下水埋深为对照试验。利用双累积曲线法、灰色关联法、敏感性分析、相对贡献率和累积距平法分析气候变化、人类活动对科尔沁沙地南缘樟子松人工林地下水埋深变化的影响特征。[结果] 研究期间, 沙地南缘樟子松人工林地下水埋深变化趋势变小为波动减小(0.385 m/a)。各气象因素对其影响程度由小到大依次为降雨量<相对湿度<蒸发量<平均气温; 敏感程度为相对湿度<蒸发量<平均气温<降水量; 各因素对地下水埋深的贡献由小到大依次为平均气温<蒸发量<降雨量<相对湿度。运用累积距平法判断 2020 年为气象因子突变年份, 气候突变降低研究区地下水埋深及其变异性。樟子松人工林提高枯水年份地下水埋深, 降低丰水年份地下水埋深。[结论] 气候因素和人类活动二者综合影响研究区地下水埋深, 且不同气象因子对地下水埋深影响存在较大差异; 气候突变、樟子松人工林均可改变地下水水文情势。

关键词: 地下水埋深; 樟子松; 草地; 人类活动; 气候变化

中图分类号: X143.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0129-10

Study on the Change Trend and Driving Mechanism of Groundwater Depth in the Horqin Sandy Land

LANG Minghan¹, ZHANG Xueli¹, ZHANG Shihang¹, FAN Shenghao², ZHANG Risheng¹

(1. Liaoning Zhanggutai Desert Ecosystem Research Station, Liaoning Institute of Sandy Land Control and Utilization, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Soil and Water Conservation Bureau of Liaoning Province, Shengyang 110003, China)

Abstract: [Objective] To gain a deeper understanding of the pattern of groundwater changes in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in sandy areas, as well as the driving mechanisms of climate change and anthropogenic activities. [Methods] The groundwater depth of *P. sylvestris* plantation in the sandy land from 2018 to 2023 was studied, and the groundwater depth of sandy grassland was used as the control. The groundwater depth of *P. sylvestris* plantation on the southern edge of the Horqin Sandy Land and its response to climate change and anthropogenic activities were analyzed by using methods including double cumulative curve method, grey correlation method, sensitivity analysis, relative contribution rate method, and cumulative anomaly method. [Results] During the 6-year period, groundwater depth in *P. sylvestris* plantation on the southern edge of the sandy land showed a decreasing trend (0.385 m/a). The influence of various meteorological factors on groundwater depth was ranked as: precipitation<relative humidity<evaporation<average temperature. The sensitivity of groundwater depth to these factors was ranked as relative humidity<evaporation<average temperature<precipitation. The contribution rate of various factors to groundwater depth was ranked as average

收稿日期: 2024-12-24

修回日期: 2025-02-21

录用日期: 2025-04-14

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(32071836); 国家重点研发计划项目(2022YFF1302505-02, SQ2023YFD1500036); 辽宁省农业科学院基本科研业务费计划项目(2021HQ1913)

第一作者: 郎明翰(1995—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事森林生态研究。E-mail: 18804502009@163.com

通信作者: 张日升(1976—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事荒漠化防治和森林培育研究。E-mail: zrs973204@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

temperature < evaporation < precipitation < relative humidity. According to the cumulative anomaly method, 2020 was identified as a year of abrupt changes in meteorological factors. Climate change reduced groundwater depth and variability in the study area. *P. sylvestris* plantation increased groundwater depth during dry years and decreased it during wet years. [Conclusion] Both climatic factors and anthropogenic activities collectively influence groundwater depth in the study area. There are significant differences in the impact of different meteorological factors on groundwater depth. Abrupt climate changes and *P. sylvestris* plantation can alter the hydrological regime of groundwater.

Keywords: groundwater depth; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; grassland; anthropogenic activities; climate change

Received: 2024-12-24

Revised: 2025-02-21

Accepted: 2025-04-14

Online(www.cnki.net): 2025-05-21

水资源既是一种基础性自然资源,又是一种战略性经济资源,是人类生存发展中最为重要的资源。我国年平均降水量为 630 mm,水资源总量位居世界第 6,但人均水量在 149 个国家中排第 110 位,属于严重缺水国家^[1]。随着中国社会经济的快速发展,人类社会对水资源的需求日益增加。在水资源的构成组分中,地下水是极为关键的组成部分,在自然环境中有着无法被取代的重要地位。在全球可利用淡水总量中,地下水的淡水储量所占比例高达 98% (不包括冰川)^[2],其在维持生态系统水循环的稳定性及保障生态系统环境可持续发展方面,有着极为重要的作用^[3]。地下水资源有着诸多优点,其分布空间较为广泛,水质洁净,不容易遭受污染,具备较强的调节能力,而且可利用程度也比较高。地下水作为生活用水的重要来源渠道之一,同时也是优质的备用水源储备地^[4]。我国广大农村地区,其生活水源大多来源于地下水。目前,我国地下水开采量超过 1 000 亿 m³,在总供水量中占比高达 20%。特别是在我国干旱—半干旱地区,降雨量偏少,地表水较为短缺,一直以来,地下水都是工、农、牧业生产与生活用水的主要来源^[5]。地下水埋深受诸多因素影响,就气候因子而言,包含降水量、蒸发量、气温等;从人类活动方面来看,涵盖灌溉水量、作物种植种类及面积、工农生活用水结构及人工开采地下水等^[6]。不合理、不规范的利用开采地下水不仅仅加剧供需的矛盾,并且引起一系列水资源和生态环境问题,如地下水位持续下降引起的地面沉降、地面坍塌、湖泊湿地萎缩、土壤盐碱化和荒漠化等^[7],进而严重影响社会经济和水资源的可持续发展^[8]。

针对以上问题,已有学者^[7]做了一定的研究。据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的相关估计数据显示,自 1861 年起,全球平均地表气温已经出现一定幅度的上升,其上升幅度大致为(0.6±0.2)℃。预测

结果表明,在接下来的 100 a,全球平均地表气温依然持续升高,预计升高的幅度约为 2~4℃^[9]。温度升高影响下垫面地表蒸散发,进而影响水循环的过程。因此,温度的变化可通过影响降雨间接影响地下水储量^[10]。除温度外,土地利用、降水、植被指数、蒸发量等都是地下水埋深的影响因素。科尔沁沙地南缘由于地处干旱半干旱区是全球生态系统和水资源脆弱的地区,也是受人类活动和气候变化影响最为敏感的地区^[11]。地下水是干旱区—半干旱区生态系统构成、发展和稳定的基础,同时也决定着该地区荒漠化、绿化二者对立现象冲突性生态演替方向。目前,针对科尔沁沙地地下水的相关研究较少,赵玮等^[12]研究发现,科尔沁沙地年内最高地下水埋深出现在 3—4 月,且降雨对研究区地下水埋深影响较小;朱永华等^[13]研究发现,研究区 1994 年前,地下水埋深与滞后 4 a 降水量相关系数为 -0.514;1994 年后,地下水埋深与滞后 8a 降水量相关系数为 -0.527。根据 IPCC 报告^[14]显示,未来几十年,干旱仍处于增长趋势。随着气候变化和人类活动的不断加剧,干旱发生的频次、持续时间、强度均持续增加,让水资源承载力脆弱的干旱—半干旱区,更容易受到极端干旱威胁,加剧生态系统危机。因此,亟需加强干旱半干旱区地下水埋深变化规律及其对人类活动、气候变化的响应机制研究,明确科尔沁沙地樟子松人工林地下水埋深主要影响因素及其响应驱动机制。目前,国内外研究热点着重关注灌区地下水埋深变化及成因,针对人工林地下水埋深变化的研究较少,因此,本研究利用双累积曲线法、灰色关联分析、敏感性分析、相对贡献率等分析方法全面剖析沙地[草地、樟子松人工林(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)]^[15]地下水埋深及其影响因素年际变化,继而定性定量识别各影响因素对地下水埋深影响的机制,以期提出合理的地下水资源开发决策参考意

见,同时,给出应对气候变化、保护地下水资源的有效措施与途径。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

科尔沁沙地地处我国北方沙地东部,面积约5万 km^2 ^[16],分布在内蒙古原哲里木盟(现在的通辽市)的中部和东部,原昭乌达盟(现在的赤峰市)东部及辽宁省西北部和吉林省西部。全区地势较为平缓,海拔179~632 m。沙地主要为风蚀地貌、风积地貌和河流泛滥冲击地貌,在历史时期自然植被遭受严重的破坏,植被覆盖率低,生态失衡,自然灾害频繁发生。20世纪50年代初,在此区域开展东北西部与内蒙古东部防护林工程建设。为配合治沙造林,原辽西省政府于1952年在彰武县章古台成立固沙造林实验站(现辽宁省沙地治理与利用研究所)。研究区处在辽宁省彰武县章古台镇的辽宁省沙地治理与利用研究所实验林场(42°43'N,122°22'E),海拔高度达204 m,位于科尔沁沙地的东南部区域。研究区土壤类型有风沙土、草炭土、草甸土及水稻土等4类。4种土壤类型中风沙土占比最多,高达89.4%,草甸土占8.74%,草炭土占1.55%,水稻土占0.31%。研究区土壤贫瘠,流动风沙土0~30 cm层有机质质量分数为33%~36%,其中,樟子松人工固沙林地土壤0~30 cm层有机质质量分数为42%~50%,沙土厚度为126~

128 m。研究区位于半湿润半干旱地区,截至2023年,多年平均气温为6.7℃,历年最低气温为-30.5℃,年平均降雨量450 mm,年平均蒸发量1 300 mm。研究区地处森林—草原过渡带,固沙造林主要树种为樟子松纯林,林下灌木植被有野大豆(*Glycine soja*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、细叶胡枝子(*Lespedeza daurica*)、防风(*Saposhnikovia divaricata*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、鼠李(*Rhamnus davurica*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、披碱草(*Chloris virgata*)、忍冬(*Lonicera japonica*)和拂子茅(*Calamagrostis acutiflora*)等。

1.2 样地选择与数据来源

选择樟子松人工林为试验样地,样地樟子松人工林营建于1978年,林龄为45 a。选择地形相似草地作为对照样地(图1)。樟子松人工林地海拔、坡度分别为200 m和0°,草地海拔、坡度分别为220 m和0°。本研究数据来源于辽宁章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测研究站2018—2023年地下水埋深(GD)、降水量(P)、蒸发量(ET)、平均气温(T)、相对湿度(RH)。在樟子松人工林、草地样地布设CTD-Diver水位计;气象数据来源于自动气象站(CAWS600-B型),自动记录气象指标有气温、相对湿度、降雨、蒸发量,仪器记录时间间隔均为1 h。

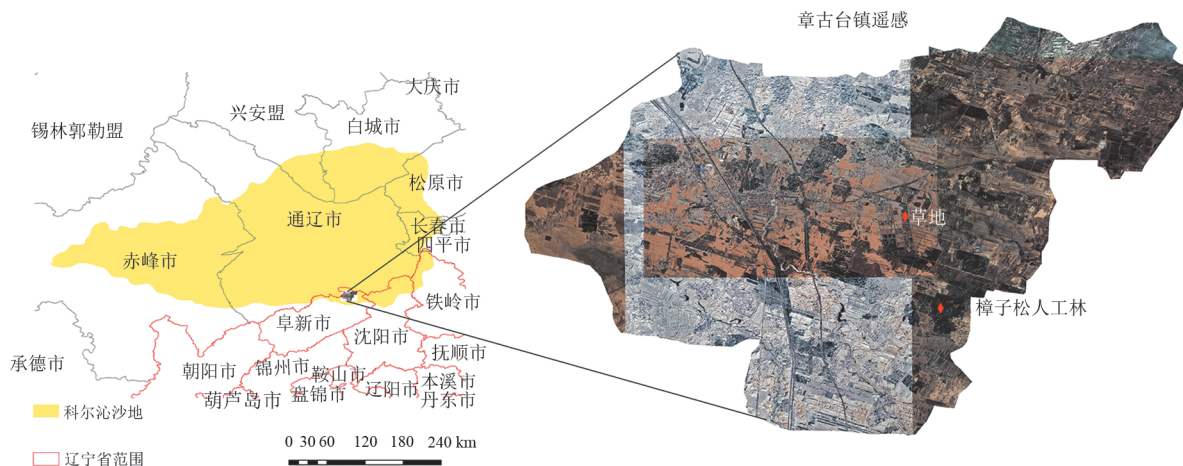


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.3 研究方法

1.3.1 双累积曲线法 双累积曲线法^[17]常被用于检验指标间关系的一致性。当双累积曲线斜率出现变化时,表示指标间关系发生改变,而斜率发生变化的突变点所对应的时间点,是指标累积关系产生突变的时间。

$$\sum \text{GD} = a \sum F + b \quad (1)$$

1.3.2 灰色关联分析 灰色关联分析法属于一种量化方法,可用于衡量系统中各因素时间序列曲线间关联度的大小。其原理是依据各因素时间序列曲线的相似程度,借助关联度来体现各因素间的密切程度,以此达到识别主要因素的目的^[18],灰色关联度值可体现因素间的密切程度,其数值越大,则意味着相关程度越高。本研究通过灰色关联度法计算平均气

温(T)、降水量(P)、蒸散发(ET)和相对湿度(RH)等影响因素对地下水埋深灰色关联度值,分析地下水埋深对影响因素响应特征。其计算公式为:

$$\zeta_{0i} = \frac{\Delta(\min) + \rho(\min)}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta(\max)} \quad (2)$$

$$r_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta_i(k) \quad (3)$$

式中: ζ_{0i} 为研究区各指标时间序列数据在 i 个时刻的灰色关联系数; $\Delta(\min)$ 和 $\Delta(\max)$ 分别为研究区经过无量纲化处理后的比较数列与参考数列的最小绝对值差以及最大绝对值差; ρ 为分辨系数,通常取0.5; $\Delta_{0i}(k)$ 为研究区数列经无量纲化后,比较数列与参考数列在第 i 个时刻的绝对值差; N 为参考数列的时刻数; $\zeta_i(k)$ 为各比较数列于第 i 时刻所对应的灰色关联系数。

1.3.3 敏感性分析 敏感性分析方法由WANG等^[19]于2011年提出,该方法是一种定量评价影响因素对时间序列曲线数据敏感性的方法。本研究通过分析地下水埋深与相对湿度(RH)、降水量(P)、平均气温(T)、蒸散发(ET)间的敏感系数,能够定量地判定地下水埋深变化针对各影响因素敏感性的强弱情况。其计算公式为:

$$\epsilon = \frac{\bar{F}}{GD} \times \frac{\sum (F_i - \bar{F})(GD_i - \overline{GD})}{\sum (F_i - \bar{F})^2} \quad (4)$$

式中: ϵ 为影响因子对应的敏感系数;若 $\epsilon > 0$,表示随影响因子数值不断增大,地下水埋深数值不断增大;若 $\epsilon < 0$,表示随影响因子数值不断增大,地下水埋深数值不断减小; F_i 为影响因子数据的第 i 个时刻; GD_i 为地下水埋深数列的第 i 个值; $\bar{F}$ 和 $\overline{GD}$ 分别为影响因子与地下水埋深数列的多年平均值。敏感系数数值的绝对值越大表示两组数据之间敏感性越强。

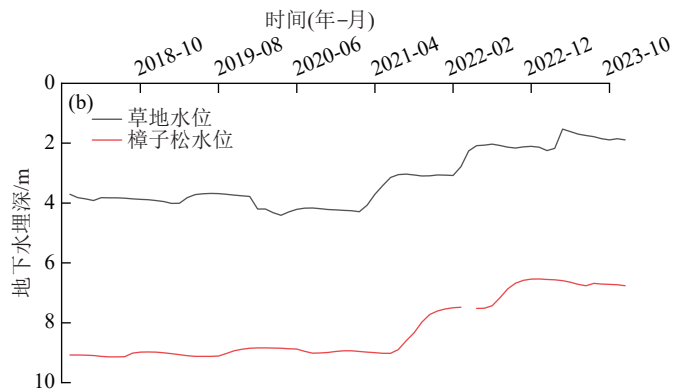
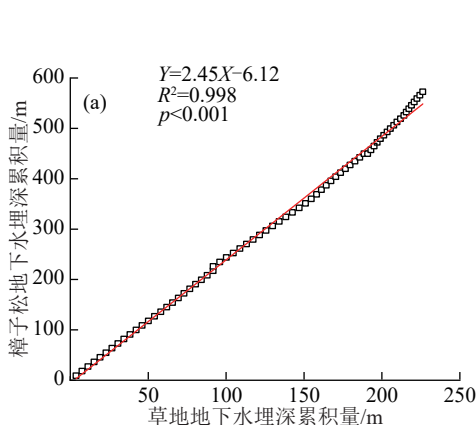


图2 草地、樟子松人工林林地地下水埋深及双累积分析

Fig. 2 Groundwater depth in grasslands and *Pinus sylvestris* plantation and double accumulation analysis

2.2 灰色关联及敏感性分析

沙地草地和樟子松人工林地下水埋深与各影响因

1.3.4 相对贡献率 相对贡献率方法旨在通过定量解析各影响因素对时间序列数据的贡献程度,进而识别主导驱动因子。研究中需首先对各影响因素及地下水埋深等时间序列数据实施标准化预处理,继而基于标准化数据集开展多元线性回归分析,最终定量确定各因素对时间序列曲线数据的贡献程度^[20]。

$$\overline{GD} = k_0 + k_1\overline{P} + k_2\overline{ET} + k_3\overline{T} + k_4\overline{HR} \quad (5)$$

$$\eta_i = \frac{k_i}{|k_1| + |k_2| + |k_3| + |k_4|} \quad (i = 1, 2, \dots, 4) \quad (6)$$

式中: $\overline{GD}$ 为完成标准化预处理的地下水埋深时间序列数据值; $\overline{P}$ 、 $\overline{ET}$ 、 $\overline{T}$ 、 $\overline{HR}$ 分别为研究降雨、蒸发量、平均气温、相对湿度的标准化数列值; k_i 为通过多元线性回归分析确定的各影响因子回归系数值; η_i 为各影响因素对地下水埋深变化的相对贡献程度。

2 结果与分析

2.1 地下水埋深变化特征

通过绘制2个水文变量的累积值曲线^[21],针对研究时段内的2个水文变量,开展变化趋势一致性的统计检验。研究区在研究时段内没有受到明显的干扰,若双累积曲线出现明显的拐点,意味着对比研究区观测时段内降雨或者地下水特征存在显著差异,说明对比研究区选取不合理。由图2可知,对比研究区的双累积地下水曲线在研究时段内无明显拐点,拟合曲线呈极显著线性相关,证明本研究选取的对比研究区合理。

由草地、樟子松林地地下水埋深变化趋势可知,2018—2023年草地和樟子松人工林林地地下水埋深多年平均值分别为3.25、8.24 m,地下水埋深呈明显减小趋势,二者降低速率分别为0.3、0.39 m/a。草地、樟子松人工林林地地下水埋深呈波动上升状态,且于2020年开始地下水埋深快速减小。

素间的灰色关联度变化趋势见图3。在灰色关联分析中,地下水埋深与4项气象因子(平均气温、降水量、蒸

发量、相对湿度)的关联度存在波动变化。平均气温、蒸发量和相对湿度的关联度总体呈增长态势,降水量的关联度则呈下降趋势。由此可知,沙地草地、樟子松人工林地下水埋深与平均气温、蒸发量、相对湿度密切关系逐渐增加,降水量与地下水埋深密切关系逐渐减小。对比草地、樟子松人工林地下水埋深与各影响因素灰色关联度拟合曲线可知,草地和樟子松人工林地与各影响因素的灰色关联度演变规律相近,各因素对地下水埋深的灰色关联度均呈同向增减趋势。在草地中,地下水埋深—平均气温灰色关联度值最大、最小分别为2020年6月、2020年12月;地下水埋深—降水量灰色关联度值

最大最小值分别为2021年9月、2021年2月;地下水埋深—蒸发量灰色关联度值最大最小值分别为2018年5月、2021年6月;地下水埋深—相对湿度灰色关联度值最大最小值分别为2022年5月、2019年8月。在樟子松人工林地中,地下水埋深—平均气温灰色关联度值最大、最小分别为2018年7月、2018年1月;地下水埋深—降水量灰色关联度值最大最小值分别为2023年1月、2018年2月;地下水埋深—蒸发量灰色关联度值最大最小值分别为2019年5月、2021年6月;地下水埋深—相对湿度灰色关联度值最大最小值分别为2022年5月、2019年8月。

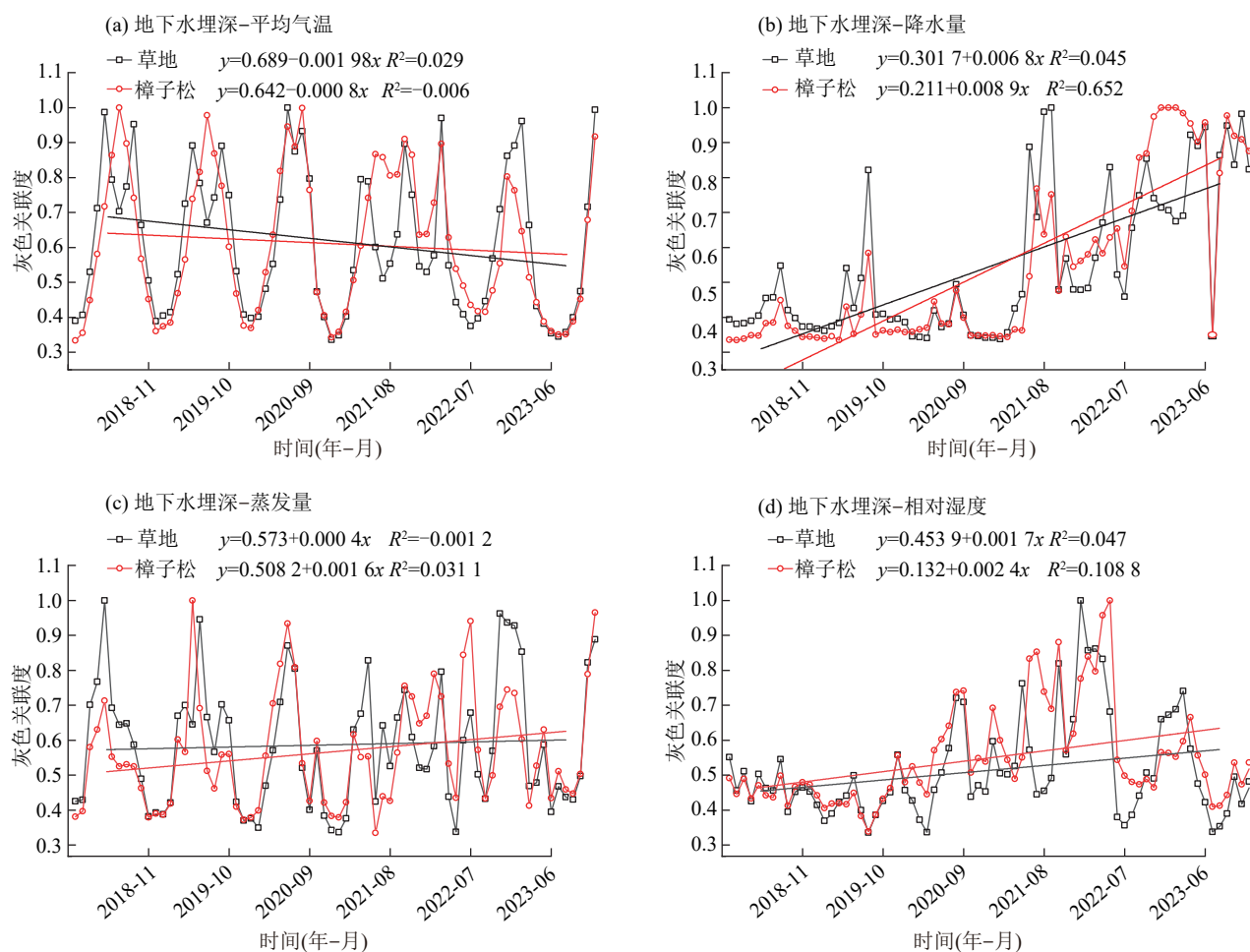


图3 各影响因素灰色关联度变化趋势

Fig. 3 Variation trend of grey correlation degree of each influencing factor

草地、樟子松人工林地地下水埋深与各影响因素整体的灰色关联度和敏感系数见表1。2018—2023年草地地下水埋深与平均气温、降水量、蒸发量、相对湿度的灰色关联度分别为0.6124、0.5453、0.5869和0.5148。由此可知,草地地下水埋深对各影响因素相应程度由小到大的顺序依次为相对湿度<降雨量<蒸散发<平均气温,即平均气温对草地地下水埋深影响最大,相对湿度最小。草地地下水埋深对平均气温、降水量、蒸发量和相对湿度的敏感系数依次为-0.0146、-0.0326、

0.0401和-0.3565。其中,该埋深随平均气温、降水量和相对湿度的升高呈递减趋势,随蒸发量增加呈递增响应。基于敏感系数绝对值的比较,各因素对草地地下水埋深的敏感程度排序为蒸发量>相对湿度>降水量>平均气温,表明蒸发量对草地地下水埋深的影响敏感性最高,而平均气温的敏感性最低。2018—2023年樟子松人工林地地下水埋深与各影响因素的灰色关联度分别为平均气温(0.6107)>蒸发量(0.5677)>相对湿度(0.5505)>降水量(0.5388),即平均气温对樟子松人工

林地地下水埋深影响最大,降水量最小。樟子松人工林地地下水埋深对平均气温、降水量、蒸发量和相对湿度的敏感系数依次为-0.018 1、-0.004 1、-0.023 8和-0.094 1。表明该埋深随各影响因子的升高均呈递减

趋势。基于敏感系数绝对值的量化比较,樟子松人工林地地下水埋深对各因素的敏感程度排序为相对湿度>蒸发量>平均气温>降水量,其中相对湿度的影响敏感性最高,降水量的敏感性最低。

表 1 灰色关联度和敏感系数

Table1 Sensitivity coefficient and grey correlation degree						
指标	下垫面	比较类型	平均气温	降水量	蒸发量	相对湿度
地下水埋深	草地	灰色关联度	0.612 4	0.545 3	0.586 9	0.514 8
		敏感系数	-0.014 6	-0.032 6	0.040 1	-0.356 5
	樟子松林地	灰色关联度	0.610 7	0.538 8	0.567 7	0.550 5
		敏感系数	-0.018 1	-0.004 1	-0.023 8	-0.094 1

2.3 相对贡献率

由表 2 可知,气候变化对地下水埋深变化的贡献率,2018—2023 年平均气温、降水量、蒸发量、相对湿度对草地地下水埋深贡献率分别为 17.95%、8.61%、1.93%、71.51%;平均气温、降水量、蒸发量、相对湿度对樟子松人工林地地下水埋深贡献率分别为 8.78%、20.03%、12.87%、58.32%。各影响因素对地下水埋深贡献率大小顺序存在差异,草地中蒸发量对地下水埋深贡献率最低,樟子松人工林地中平均气温对樟子松人工林地地下水埋深贡献率最低。综合 2019—2023 年数据分析,研究区各影响因素对地下水埋深的贡献度排序为相对湿度>降水量>平均气温>蒸发量。其中,相对湿度的平均贡献率最高,达到 64.92%,而蒸发量的平均贡献率最低,仅为 7.4%。

2.4 气候突变对地下水埋深的影响

运用累积距平法(CAM)对研究区各气象影响因素突变时间进行分析(图 4),累积距平值平均气

温曲线时间拐点分别为 2019 年、2020 年,降水量曲线时间拐点为 2020 年、2021 年,蒸发量曲线时间拐点为 2020 年、2021 年,相对湿度曲线时间拐点为 2020 年。由此可知,2020 年为研究区气象因素突变的时间节点,与图 3 中 2020—2021 年草地、樟子松人工林地地下水埋深均明显较小的趋势规律相符合。突变前后月平均气温分别为 6.34、7.40℃,提高 16.72%;月降水量分别为 42.73、68.97 mm,提高 61.41%;月蒸散发分别为 82.24、71.48 mm,降低 13.08%;月相对湿度分别为 49.67%、68.07%,提高 37.04%。

表 2 气候变化对地下水埋深变化的贡献率

Table 2 Contribution rate of climate change to the change of groundwater depth					
	下垫面	平均气温	降水量	蒸发量	相对湿度
	草地	17.95	8.61	1.93	71.51
	樟子松林地	8.78	20.03	12.87	58.32
	平均	13.37	14.32	7.40	64.92

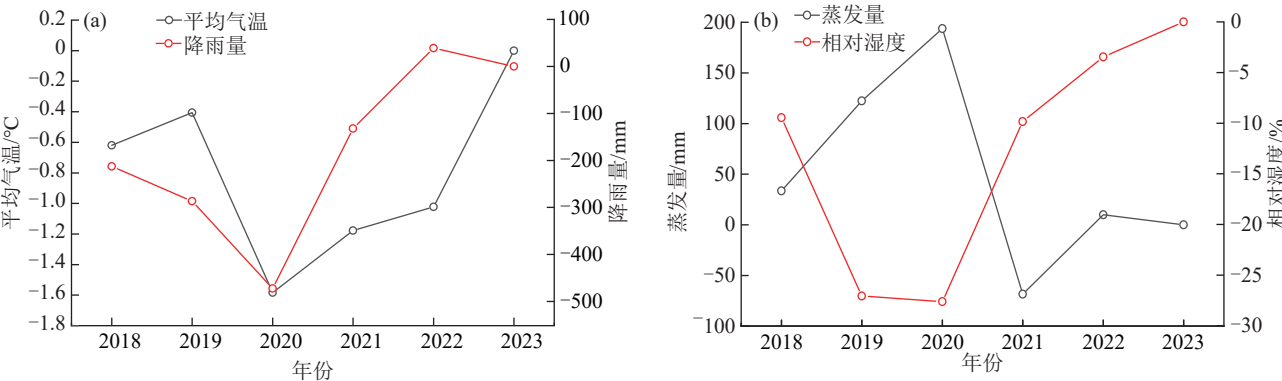


图 4 气象因素累积距平值

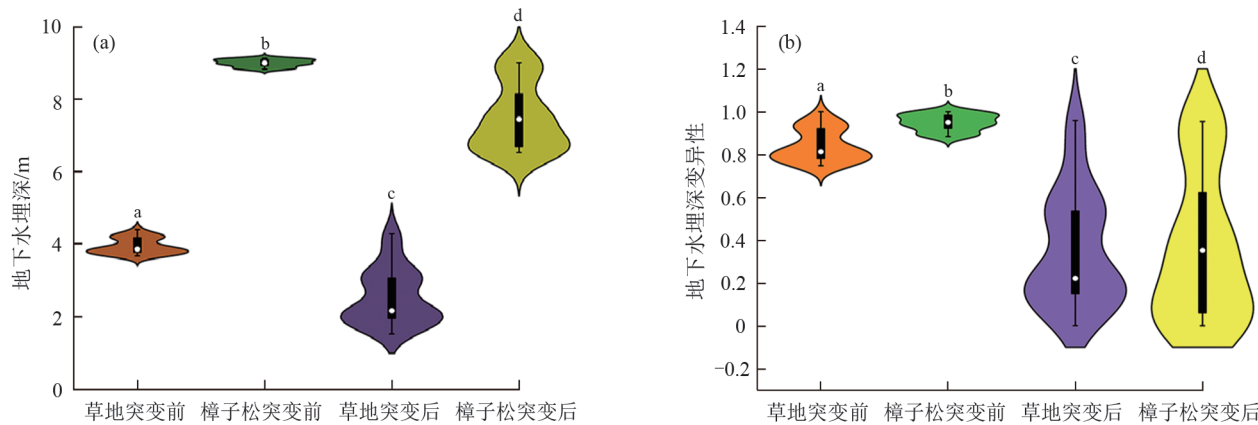
Fig. 4 Cumulative anomaly curve of meteorological factors

由图 5 可知,气象因素突变前草地地下水埋深均值、中位值分别为 3.95、3.87 m,突变后地下水埋深平均值、中位值分别为 2.55、2.17 m,降低 35.52%、44.00%。突变前樟子松人工林地地下水埋深平均值、中位值分别为 9.01、9.01 m,突变后地

下水埋深分别为 7.48、7.46 m,降低 16.92%、17.25%。引入草地、樟子松人工林地地下水埋深变异性可知,突变前草地地下水埋深变异性均值、中位值分别为 0.839 8、0.812 5,突变使其降低 57.96%、72.74%。樟子松人工林地地下水埋深变

异性均值、中位值分别为 0.947 8、0.949 6,突变使其降低 61.76%、62.89%。由此可知,气象因素突

变显著地($p<0.05$)降低研究区地下水埋深和地下水深变异性。



注:图中不同小写字母为差异达到显著水平($p<0.05$);黑色箱体表示数据 25%~75% 分布范围,黑色线表示数据的四分位距,白色数据点表示中位数。下同。

图 5 地下水埋深、变异性及单因素差异性检验

Fig. 5 Groundwater depth, its variability and single-factor difference test

2.5 樟子松人工造林对地下水埋深的影响

由于草地、樟子松人工林地地下水埋深初始差异较大,因此,以 2018 年 1 月地下水埋深为基准,在整个观测期内,草地、樟子松人工林地地下水埋深相对变化量曲线均呈波动上升趋势,但二者波动步长、时机均具有明显差异,最终樟子松人工林地地下水埋深相对变化量(−2.31 m)低于草地地下水埋深相对变化量(−1.82 m)(图 6)。在超过地下水埋深过程曲线上,0~21%、30%~37% 频率区间上的樟子松人工林地地下水埋深明显高于草地,21%~30%、37%~100% 频率区间上的樟子松人工林地地下水埋深明显低于草地(图 7)。草地地下水埋深变异性与樟子松人工林地地下水埋深变异性平均值分别为 0.464 8 和 0.537 1,二者未出现显著不同($p>0.05$)(图 8)。表明樟子松人工林造林 44 a 降低高地下水埋深,提高低地下水埋深,未影响地下水埋深的变异性。

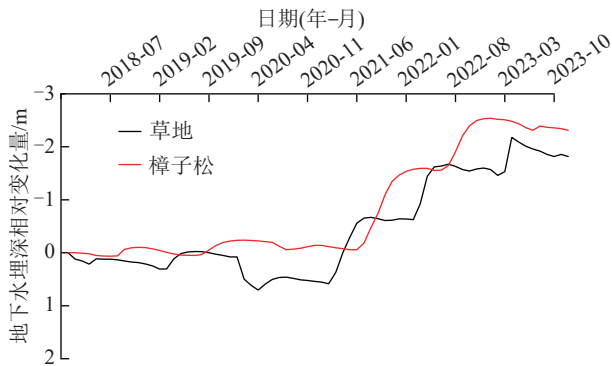


图 6 地下水埋深相对变化量

Fig. 6 Relative variation of groundwater depth

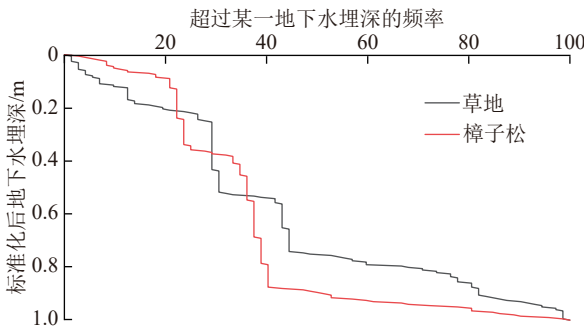
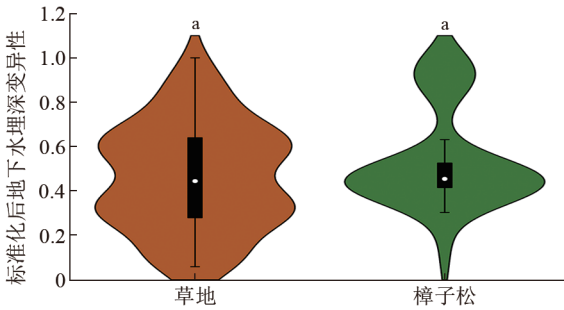


图 7 地下水埋深过程

Fig. 7 Groundwater depth curves



注:图中相同小写字母为差异未达到显著水平($p>0.05$)。

图 8 地下水埋深变异性及单因素差异性检验

Fig. 8 Variation of groundwater depth and single-factor difference test

3 讨论

3.1 气候变化对地下水埋深的影响

在干旱半干旱区,水分生态系统中极其重要的组成部分,尤其在沙地生态系统中,水分更是主要的限制因子,也是所有生物生命之源^[22]。降雨是该地区水文补给的主要来源,降雨量、强度等因素直接影响研究区水分运移循环,降雨对土壤水分的补给、土壤质地、地

貌、植被等因素综合决定着研究区地下水埋深的变化^[23]。本研究中,以不同类型地类(草地、樟子松人工林)地下水埋深为对象研究发现,草地、樟子松人工林地地下水埋深对各影响因素敏感性差异较大,草地地下水埋深对蒸发量的敏感性最高,对平均气温敏感性最低;樟子松人工林地地下水埋深对平均气温的敏感性最高,对降雨量敏感性最低。通过计算各影响因素对草地、樟子松人工林地地下水埋深的贡献率发现,相对湿度对地下水埋深贡献率最大。叶尔羌河流域灌区、麦盖提灌区^[24]地下水埋深均是对蒸发量敏感性最高。张彦等^[25]研究发现,在灌区水循环过程中,平均气温与蒸发量作为水量消耗的主导驱动因素,二者与地下水埋深均呈现显著正相关;张冠儒等^[26]研究发现,蒸发量和地表水灌溉是影响灌区地下水埋深的主要因素。与本研究草地地下水埋深与各影响因素敏感性规律一致,与樟子松人工林敏感性规律有差异。可见,由于不同植被类型差异,各影响因素与地下水埋深间的关系存在较大差异。不同植被对降雨截留分配的差异、植被蒸腾强度的差异均有可能是导致各影响因素与地下水埋深相关差异的原因。

受气候变化综合因素的复合影响^[27],全球气候变化背景下,极端气候事件(如热浪、干旱、暴雨)的频发态势对陆地生态系统水文过程及水资源时空分布格局构成显著威胁。近年来,学术界逐渐聚焦于极端气候事件对生态系统服务功能的级联效应研究,尤其关注其通过改变降水—蒸散平衡、土壤水热条件及植被生理过程,对区域水文循环稳定性干扰机制。地下水在水分循环中常常扮演着调节生态系统内部水分平衡的角色,极端干旱气候情况下可补充土壤水分,供给植被用水;丰水年可储存多余水分。曹思佳等^[28]研究发现,极端干旱气候导致地下水埋深大幅度增加,最大水位降幅可达 5 m 左右,极端干旱情况地下水成为生态系统水分补给的重要来源。极端干旱使地下水成为生态系统水“源”之一;丰雨年降水可快速补给地下水,此时地下水成为蓄水水库,地下水在生态系统中表现为“汇”。本研究中,长期的丰水年显著降低地下水埋深及其变异性。

3.2 樟子松人工林对地下水的影响

除气候变化对地下水有显著影响外,不同植被类型也能引起地下水水文情势的变化,研究区表层广泛分布着风沙土,大气降水垂直入渗补给能力强,因此,地下水补给来源较为复杂。樟子松人工林造林 44 a,改变研究区的立地条件。地下水与植被类型、分布密切相关,从长时间尺度看,地下水埋深波动变化可影响到研究区植被的构成、生长和演替^[29],植被的变化也可影响地下水埋深的波动变化,针对二者耦合机制的研

究,对保障干旱区生态系统结构稳定性及功能可持续性具有关键科学意义^[30]。本研究中,44 a 樟子松人工林提高研究区枯水年地下水埋深,降低丰水年地下水埋深,但未影响地下水埋深的变异性。二者地下水埋深数据动态变化规律差异主要是植被引起的,地下水埋深变化主要取决于其“收支”状况,“收”来源于降水,樟子松人工林植被从上到下的结构相较于草地更为复杂,樟子松人工林乔木层内部形成“乔灌草”复合生态系统,其内部形成隔绝大气-土壤的小气候,相同气候条件下,水分在植被中再分配特征差异较大,降雨穿透植被、土壤层最终补给地下水的“量”和“历时”皆有所不同。“支”取决于下垫面蒸散发,在干旱区土壤水分对植被的补给很大程度上依赖于毛细根的吸水^[31]。当地下水比较深时,不同植被类型吸水竞争力取决于根系深度,樟子松根系相对于草地的根系更深,樟子松可利用到更深的地下水埋深;樟子松人工林相对于草地具有更强的蒸腾能力。综上所述,本研究中樟子松人工林是改变地下水埋深动态特征的主要因素。研究区下垫面植被类型是导致水循环发生改变的直接因素,未来的研究中需要根据具体情况分析不同植被类型改变生态系统水分平衡的机制。

4 结 论

1) 科尔沁沙地南缘 2018—2023 年地下水埋深呈明显减小趋势,其草地、樟子松人工林地年平均值分别为 3.25、8.25 m;地下水埋深减小速率分别为 -0.303 、 -0.385 m/a。

2) 樟子松人工林地地下水埋深对各影响因素相应程度大小为平均气温(0.6107) $>$ 蒸发量(0.5677) $>$ 相对湿度(0.5505) $>$ 降水量(0.5388),平均气温是研究区影响最大的气象因子。

3) 草地、樟子松人工林地二者基于敏感系数的量化分析表明,地下水埋深对各影响因素的敏感性呈显著差异。草地地下水埋深随平均气温、降水量和相对湿度的增大而减小,随蒸发量增大而增大;樟子松人工林地地下水埋深随 4 种影响因子增大而减小。

4) 研究区各影响因素对地下水埋深贡献大小依次为相对湿度(64.92%) $>$ 降水量(14.32%) $>$ 平均气温(13.37%) $>$ 蒸发量(7.4%),相对湿度是地下水埋深的主要贡献者,贡献率超过 50%。

5) 气候突变降低研究区地下水埋深及其变异性。

6) 在枯水年,樟子松人工林提高研究区地下水埋深;在丰水年,人工林降低研究区地下水埋深。

参考文献:

[1] 郝静.北京市朝阳区地下水脆弱性评价研究[D].北京:北京工业大学,2013.

HAO J. Research on groundwater vulnerability assess-

- ment in Chaoyang District Beijing [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [2] WANG S J, LIU H, YU Y, et al. Evaluation of groundwater sustainability in the arid Hexi Corridor of northwestern China, using GRACE, GLDAS and measured groundwater data products [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: e135829.
- [3] 张娜, 韩小龙, 汤英, 等. 宁夏石嘴山市引黄灌区地下水时空变化特性及影响因素 [J]. *干旱区研究*, 2020, 37(5): 1124-1131.
- ZHANG N, HAN X L, TANG Y, et al. Temporal and spatial characteristics of groundwater and its influencing factors in the Yellow River diversion irrigation area of Ningxia Shizuihan [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(5): 1124-1131.
- [4] HOLMAN I P, TASCONE D, HESS T M. A comparison of stochastic and deterministic downscaling methods for modelling potential groundwater recharge under climate change in east Anglia, UK: Implications for groundwater resource management [J]. *Hydrogeology Journal*, 2009, 17(7): 1629-1641.
- [5] KENDY E, GÉRARD-MARCHANT P, WALTER M T, et al. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the north China plain [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(10): 2011-2031.
- [6] 樊丽琴, 吴霞, 李磊, 等. 平罗县不同地下水位分布区地下水埋深变化特征分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(6): 107-114.
- FAN L Q, WU X, LI L, et al. Spatiotemporal variation in groundwater table in Pingluo County [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(6): 107-114.
- [7] GROGAN D S, ZHANG F, PRUSEVICH A, et al. Quantifying the link between crop production and mined groundwater irrigation in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 161-175.
- [8] LI Y F, FENG J G, WANG W, et al. Optimization and rationalization of karst groundwater resource in Feicheng basin, China [J]. *Environmental Geology*, 2007, 53(4): 741-749.
- [9] 王璟珉. 全球气候变化问题的认知比较研究 [D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2007.
- WANG J M. The cognitive comparative research on global climate change [D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2007.
- [10] 李巧媛. 不同气候变化情景下青藏高原冰川的变化 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2011.
- LI Q Y. The glacier variation of tibetan plateau under different climate changes scenarios [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2011.
- [11] HUANG J P, YU H P, GUAN X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [12] 赵玮, 张铜会, 赵学勇, 等. 近5 a来科尔沁沙地典型区域地下水埋深变化分析 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 995-1000.
- ZHAO W, ZHANG T H, ZHAO X Y, et al. Dynamics of groundwater depth in typical zone of Horqin sand land from 2002 to 2006 [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(5): 995-1000.
- [13] 朱永华, 张生, 孙标, 等. 科尔沁沙地典型区地下水、降水变化特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2017, 40(4): 718-728.
- ZHU Y H, ZHANG S, SUN B, et al. Variation of groundwater and precipitation in typical zone of Horqin sandy area [J]. *arid Land Geography*, 2017, 40(4): 718-728.
- [14] SHEFFIELD J, WOOD E F, RODERICK M L. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012, 491(7424): 435-438.
- HUANG Y, WU L J, ZHAO G. Effects of seasonal drought on spatial-temporal changes of vegetation phenology in the Loess Plateau [J]. *Yellow River*, 2023, 45(3): 108-113.
- [27] 于海英, 杨莉琳, 谭廷鸿, 等. 北京东灵山森林木本植物物候对气温响应的季节差异 [J]. *林业科学研究*, 2023, 36(3): 80-90.
- YU H Y, YANG L L, TAN T H, et al. Divergent responses of woody plant phenology to seasonal temperature in Dongling mountain of Beijing [J]. *Forest Research*, 2023, 36(3): 80-90.
- [28] 刘俏华, 姚秀萍, 马嘉理, 等. 青藏高原夏季极端降水研究进展与展望 [J]. *大气科学学报*, 2024, 47(5): 737-754.
- LIU Q H, YAO X P, MA J L, et al. Research progress and prospects on summer extreme precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2024, 47(5): 737-754.

(上接第128页)

- [24] 刘世博. 汉江上游流域水源涵养功能时空演变及其驱动因素研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- LIU S B. Temporal and spatial evolution of water conservation function and its driving factors in the upper reaches of Hanjiang River [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [25] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 153-160.
- XIE B N, QIN Z F, WANG Y, et al. Monitoring vegetation phenology and their response to climate change on Chinese Loess Plateau based on remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 153-160.
- [26] 黄莹, 吴丽娟, 赵刚. 黄土高原植被物候时空变化及其与季节性干旱的关系 [J]. *人民黄河*, 2023, 45(3): 108-113.

- [15] 郎明翰,张日升,凡胜豪,等.科尔沁沙地南缘樟子松人工林碳汇及对气候因子的响应[J].水土保持学报,2024,38(4):236-245.
LANG M H, ZHANG R S, FAN S H, et al. Carbon sequestration function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and its responses to climate factors on the southern edge of Horqin sandy land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 236-245.
- [16] 高海燕,张胜男,杨制国,等.科尔沁沙地油松固沙林土壤真菌群落结构及功能[J].干旱区研究,2025,42(1):118-126.
GAO H Y, ZHANG S N, YANG Z G, et al. Structure and function of soil fungal community in *Pinus tabulaeformis* sand-fixing forests in Horqin sandy land [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(1): 118-126.
- [17] 郎明翰,王希臣,满秀玲,等.大兴安岭多年冻土区森林小流域基流分割[J].东北林业大学学报,2021,49(5):90-96.
LANG M H, WANG X C, MAN X L, et al. Baseflow separation of a forested watershed in the permafrost region of the Daxing'an Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(5): 90-96.
- [18] 张文鸽,侯胜玲,殷会娟.内蒙古河套灌区地下水埋深时空变化及其驱动因素[J].节水灌溉,2020(7):36-40.
ZHANG W G, HOU S L, YIN H J. Spatial and temporal variation of groundwater depth and its driving factors in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia [J]. Water Saving Irrigation, 2020(7): 36-40.
- [19] WANG Y J, LIU B, SU B D, et al. Trends of calculated and simulated actual evaporation in the Yangtze River basin [J]. Journal of Climate, 2011, 24(16): 4494-4507.
- [20] LI Z, CHEN Y N, YANG J, et al. Potential evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the arid region of northwest China [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 1025-1031.
- [21] 李伟光,陈汇林,朱乃海,等.标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J].中国生态农业学报,2009,17(1):178-182.
LI W G, CHEN H L, ZHU N H, et al. Analysis of drought monitoring on Hainan Island from standardized precipitation index [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 178-182.
- [22] 张圆浩,阿拉木萨,印家旺,等.沙丘土壤含水量与地下水埋深时空变化特征[J].干旱区研究,2020,37(6):1427-1436.
ZHANG Y H, AL M S, YIN J W, et al. Spatial and temporal variations in sand dune soil moisture content and groundwater depth [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1427-1436.
- [23] 赵思腾,赵学勇,李玉霖,等.干旱半干旱区地下水埋深对沙地植物土壤系统演变的驱动作用综述[J].生态学报,2022,42(23):9898-9908.
ZHAO S T, ZHAO X Y, LI Y L, et al. A review on the driving effect of groundwater depth on the evolution of sandy plant soil systems in arid and semi-arid region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9898-9908.
- [24] 白宜斐,王弋,陈亚宁,等.叶尔羌河流域灌区地下水埋深变化及影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(6):242-249.
BAI Y F, WANG Y, CHEN Y N, et al. Variation of groundwater depth and its influencing factors in the irrigated area of the Yarkant River basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(6): 242-249.
- [25] 张彦,程锐,邹磊,等.气候变化和人类活动对灌区地下水埋深的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(2):91-100.
ZHANG Y, CHENG R, ZOU L, et al. The effects of climate change and anthropogenic activities on groundwater in irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 91-100.
- [26] 张冠儒,魏晓妹.基于变化环境的地下水动态敏感性分析方法研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(2):223-228.
ZHANG G R, WEI X M. Methods study on sensitivity analysis of groundwater dynamics based on the changing environment [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2011, 39(2): 223-228.
- [27] 郎明翰,张日升,韩辉,等.科尔沁沙地南缘樟子松人工林对土壤水盐的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):370-376.
LANG M H, ZHANG R S, HAN H, et al. Effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on soil water and salt in the southern edge of Horqin sandy land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 370-376.
- [28] 曹思佳,李云良,陈静,等.2022年鄱阳湖极端干旱对洪泛区地下水文情势的影响[J].中国环境科学,2023,43(12):6601-6610.
CAO S J, LI Y L, CHEN J, et al. Influence of extreme drought in 2022 on groundwater hydrological regime in the Poyang Lake floodplain area [J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6601-6610.
- [29] JOHANSEN O M, ANDERSEN D K, EJRNÆS R, et al. Relations between vegetation and water level in groundwater dependent terrestrial ecosystems (GWDTEs) [J]. Limnologia, 2017, 68: 130-141.
- [30] LI M Y, DENG M J, LING H B, et al. Constructing a new irrigation model for desert riparian forests based on response of canopy EVI loss and tree rings growth to groundwater fluctuation [J]. Ecological Indicators, 2023, 148: e110060.
- [31] 朱美菲,韩政伟,雷春英,等.准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带地下水埋深对人工梭梭林年龄结构及动态特征的影响[J].生态学报,2024,44(19):8688-8698.
ZHU M F, HAN Z W, LEI C Y, et al. Influence of groundwater depth on age structure and dynamic characteristics of artificial *H. ammodendron* forests in the transition zone of desert oasis of Junggar basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8688-8698.