

地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量影响试验研究

顾南, 张建云, 刘翠善, 王振龙, 王国庆

An experimental study of the influence of groundwater level on water consumption of winter wheat in the Huaibei Plain

GU Nan, ZHANG Jianyun, LIU Cuishan, WANG Zhenlong, and WANG Guoqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系

Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin

曹乐, 聂振龙, 刘敏, 卢辉雄, 汪丽芳 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 25-33

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系

An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta

张晨晨, 黄, 何云, 刘庆生, 李贺, 吴春生, 刘高焕 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 21-30

格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张京 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 55-64

既地下水采补平衡又冬小麦稳产的探讨

A study of achieving groundwater equilibrium and stable winter wheat yield simultaneously

张雪靓, 任理 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 190-198

蒸散发水源组成与测定方法研究进展

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

王周锋, 王文科, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 1-9



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011053

地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量影响试验研究

顾南^{1,2,3,4}, 张建云^{1,2,3,4}, 刘翠善^{1,2,4}, 王振龙⁵, 王国庆^{1,2,3,4}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 5. 安徽省(水利部淮委)水利科学研究院五道沟水文水资源实验站, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 研究地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量的影响, 对浅埋区农业水管理具有重要意义。基于2017—2020年五道沟水文水资源实验站大型称重式蒸渗仪群, 模拟不同地下水埋深下冬小麦蒸散发变化过程, 以蒸散量表征小麦耗水的变化, 识别影响小麦耗水的关键环境因子, 探索不同情景小麦耗水特征。全生育期内各地下水埋深0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m下小麦蒸散量依次为510.50, 499.33, 567.88, 727.88 mm, 各埋深下表层10 cm处土壤含水率与蒸散量相关系数依次为-0.42, -0.69, -0.53, -0.43; 依据太阳辐射量划分3类典型日, 典型日内蒸散强度为: 强辐射日约0.30 mm/h、弱辐射日约0.07 mm/h、微弱辐射日约0.03 mm/h; 蒸散峰历时依次为: 5:00—20:00、7:00—17:00和9:00—17:00; 太阳辐射强时, 地下水埋深对蒸散强度峰值出现的时间影响较小, 而太阳辐射过弱时, 地下水埋深大会阻滞能量传输, 蒸散强度峰值滞后; 表层土壤水是蒸散发的主要来源, 尤其在1.0, 2.0 m埋深下表层土壤水对蒸散发贡献率更高; 太阳辐射、净辐射和土壤热通量正向驱动小麦耗水, 表层土壤水分、平均气温和空气湿度反向驱动。

关键词: 地下水埋深; 蒸散量; 聚类分析; 蒸散强度; 太阳辐射

中图分类号: P641.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0015-10

An experimental study of the influence of groundwater level on water consumption of winter wheat in the Huaibei Plain

GU Nan^{1,2,3,4}, ZHANG Jianyun^{1,2,3,4}, LIU Cuishan^{1,2,4}, WANG Zhenlong⁵, WANG Guoqing^{1,2,3,4}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Institute of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 4. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 5. Wudaogou Hydrology and Water Resources Experimental Station, Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu, Anhui 233000, China)

Abstract: The influence of groundwater level on water consumption of winter wheat in the Huaibei plain is examined, which is key for agricultural water management. Based on the group of large weighing lysimeters in the Wudaogou Hydrology and Water Resources experimental station from 2017 to 2020, the wheat evapotranspiration at various groundwater levels is simulated and the key environmental factors affecting wheat evapotranspiration are identified for the purpose of exploring the characteristics of wheat evapotranspiration. During the whole growth period, the wheat evapotranspiration at four groundwater levels (depth of 0.5, 1.0, 2.0 and 3.0 m) is 510.50,

收稿日期: 2020-11-15; 修订日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830863; 41961124007)

第一作者: 顾南(1995-), 女, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: nanguskrkr@163.com

通讯作者: 王国庆(1971-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事气候变化、水文水资源等方面的研究。E-mail: gqwang@nhri.cn

499.33, 567.88, 727.88 mm, respectively. The correlation coefficient between surface soil moisture and evapotranspiration under each groundwater level is -0.51 , -0.71 , -0.62 and -0.72 , respectively. According to the classified categories by solar radiation, three typical days are chosen with the corresponding evapotranspiration intensity of 0.30 mm/h in the strong radiation day, of 0.07 mm/h in weaker radiation day, and of 0.03 mm/h in the weakest radiation day. The peak of evapotranspiration intensity happens from 5:00 to 20:00 in the strong radiation day, from 7:00 to 17:00 in the weaker radiation day, and from 9:00 to 17:00 in the weakest radiation day. The stronger the solar radiation, the weaker the influence of groundwater level on the peak of evapotranspiration intensity. This is probably because the large groundwater level may block energy transmission so that the peak of evapotranspiration intensity lags behind. Surface soil is the main source of evapotranspiration, especially at depth of 1.0 and 2.0 m. Simultaneously, solar radiation, net radiation and soil heat flux drive wheat evapotranspiration positively, while surface soil moisture, average air temperature and air humidity drive contrariwise.

Keywords: groundwater table; evapotranspiration; clustering analysis; evapotranspiration intensity; the solar radiation

地下水是生态系统中重要水源之一,其水位波动会直接影响作物耗水量的变化^[1]。作物耗水量包括消耗于作物蒸腾、土壤蒸发与作物组织的水量^[2]。由于作物组织消耗的水量占总耗水量比例极小,可忽略不计,一般用蒸散量(作物蒸腾和土壤蒸发之和)衡量耗水量的变化。

作物耗水量的研究具有地域性,不同生长区域作物的耗水过程对地下水埋深的响应及驱动因子存有差异^[3-5]。解析地下水对作物耗水影响的研究多在地下水深埋区展开。在地下水深埋区,深根型作物蒸散耗水量较大。在额济纳绿洲,地下水对胡杨的蒸散发起调节作用,胡杨林的耗水也持续引起地下水位下降^[6]。在鄂尔多斯盆地,沙柳蒸散发对地下水的利用率约 20%~40%,当地下水埋深大于 2.15 m 时,沙柳无法消耗地下水^[7]。根系浅的作物主要消耗土壤水,对深埋区地下水的利用效率低。在法属圭亚那热带森林,地下水埋深大时,藤本植物因根系浅,比树木更能有效捕捉土壤表层水分^[8]。由于地下水与地表水的交互频繁,浅埋区内作物的耗水水源、耗水量等特征与深埋区内特征有差异,但是地下水埋深对作物耗水影响的相关研究鲜有报道^[9-10]。

淮北平原属地下水浅埋区,地下水埋深在 1~3 m 变化。淮北平原作为小麦气候适宜生长区,常年种植小麦面积在 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上^[11]。前人对淮北平原冬小麦耗水机理的研究主要集中在土壤水分、地下水埋深、养分等因素对小麦潜水蒸发、生长发育和产量的影响等方面^[12-15]。淮北平原地下水埋深对冬小麦耗水量的影响研究仍处于探讨阶段。本研究以地下水埋深为控制变量,在安徽省五道沟水文水资源实验站

开展砂姜黑土区冬小麦耗水机理研究,以期揭示浅埋区地下水埋深对小麦耗水过程的影响,为浅埋区水资源管理、植被建设和当地农业生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮北平原东接江苏,南临淮河,西与河南毗邻,北与山东接壤,包括阜阳、宿州、淮北、淮南、蚌埠、亳州 6 个市 27 个县(区),全区总面积 $3.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中平原占总面积的 98.0%。

淮北平原属暖温带半湿润季风气候区,地处南北气候过渡带。年均降水量 900 mm,降水量年际变化大,年内分布极不均衡。年均气温 $15.1 \text{ }^\circ\text{C}$,年均日照时数 1 729.4 h,年均相对湿度 73%。淮北平原砂姜黑土分布广泛,约占耕地面积的 56%。作物以小麦、玉米、大豆等农作物为主^[16]。由于冬季干旱少雨,冻融期主要集中在 12—翌年 2 月,冻土厚度较薄^[13]。

1.2 数据来源

试验区为五道沟水文水资源实验站,位于安徽省蚌埠市新马桥镇原种场。土壤含水率和蒸散量通过大型称重式蒸渗仪测量。蒸渗仪内装有砂姜黑土原状土,其原理如图 1 所示。蒸渗仪依据马氏瓶原理构建,通过水平衡器控制地下水埋深。蒸渗仪内地表以下不同深度埋有土壤水分传感器,底端设有压力传感器。测量要素包括:10 cm 处土壤水分,1 h/次;10,30 cm 处地温,1 h/次;作物蒸散量,10 min/次;潜水蒸发量和入渗量,10 min/次。气象数据源于蒸渗仪南侧 2 m 高处高精度气象站,测量要素包括:气温、湿度、太阳辐射、净辐射、气压、风速和雨量,10 min/次。气象场

内放置 E601 型蒸发器, 早晚 8 点人工观测水面蒸发量。

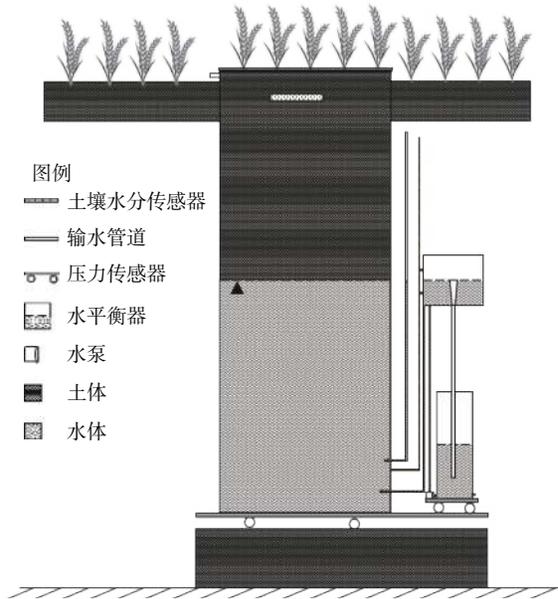


图 1 蒸渗仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the weighing lysimeter

1.3 试验与方法

(1) 试验方案与生育阶段划分

2017—2020 年, 试验通过大型称重式蒸渗仪开展。以砂姜黑土区典型作物冬小麦蒸散量为研究对象。试验期间未进行灌溉, 小麦依靠天然降水补给。蒸渗仪内控制地下水埋深为 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m。

参考联合国粮食及农业组织推荐作物时段划分表^[17], 并结合淮北平原物候资料, 将冬小麦生育期划分为初期、发育期、中期和后期, 具体时段见表 1。初期指作物生长前期, 地表基本无植被覆盖; 发育期指初期结束到地面基本被植被覆盖; 中期指地表充分覆盖到作物成熟; 后期指生育晚期, 即中期结束到收获。

表 1 不同地下水埋深下冬小麦生育阶段的划分
Table 1 The partition of wheat growth stages at various groundwater levels

地下水埋深/m	初期/d	发育期/d	中期/d	后期/d	全生育期时段
1.0	81	59	32	20	2017-11-11—2018-05-27
3.0	81	68	34	32	2018-11-01—2019-06-03
0.5, 2.0	85	59	30	29	2019-11-01—2020-05-24

(2) 作物蒸散量

蒸渗仪底部压力传感器测量蒸渗仪重量的变化表示该时段的作物蒸散量, 测量频率为 10 min/次。由于蒸渗仪会受到外界环境干扰和系统影响, 原始数据

需经过缺失值插补、异常点识别和平滑数据处理, 以此消除噪声和减少异常数据, 得到更为精确的小时尺度蒸散量, 累加后得到日尺度蒸散量产品。

(3) 统计指标与方法

文中主要使用的统计指标与方法包括方差、变异系数、相关系数、归一化处理和聚类分析。

方差用于描述数据的离散程度:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

式中: S^2 ——方差;

x_i ——样本数据, $i = 1, 2, \dots, n$;

\bar{x} ——样本序列平均值;

n ——样本个数。

变异系数用于消除测量尺度和量纲影响并衡量数据的离散程度:

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} \quad (2)$$

式中: Cv ——变异系数;

S ——样本序列标准差;

\bar{x} ——样本序列平均值。

相关系数用于描述两个变量之间的相关程度:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: r ——相关系数;

x_i, y_i ——样本数据, $i = 1, 2, \dots, n$;

\bar{x}, \bar{y} ——样本序列平均值;

n ——样本个数。

归一化处理用于消除不同类型测量尺度和量纲影响:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中: x' ——归一化后数据;

x ——待归一化数据;

x_{\min} ——样本序列中最小值;

x_{\max} ——样本序列中最大值。

选择应用广泛的 k-means 算法进行聚类分析。原理是将给定的样本序列划分为 k 个簇, 使得簇内点与点的距离尽可能小, 簇之间的距离尽可能大。

假定划分 k 个簇 ($C_1, C_2, C_3, \dots, C_k$), 划分时总目标为平方误差和最小, 即:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|_2^2 \quad (5)$$

$$\mu_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x \quad (6)$$

式中: E ——平方误差和;

x ——样本数据;

C_i ——第 i 个簇, $i = 1, 2, \dots, k$;

μ_i ——簇 C_i 的聚类中心;

k ——簇的个数。

具体计算步骤见文献 [18]。

2 结果与分析

2017—2020 年利用五道沟实验站大型称重式蒸渗仪群开展冬小麦试验, 测量同期气象数据, 模拟不

同地下水埋深 (0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m) 冬小麦蒸散量的变化过程。

2.1 不同地下水埋深下冬小麦生长季蒸散变化

不同小麦生育期内气象特征各不相同, 表 2 展示了试验期间部分气象因子的变化。气象环境是引起蒸散量变化的主要原因之一^[18-19]。对比不同埋深下小麦蒸散量在全生育期的分布 (图 2), 初期、发育期、中期和后期的蒸散量占全生育期蒸散量的比例分别为 23.76%、27.62%、27.87%、21.87%。初期和发育期为生长前期, 占比最大值均在地下水埋深为 3.0 m。而中期占比最大值出现在地下水埋深 1.0 m, 后期最大值在地下水埋深 2.0 m。不同生育阶段内最大占比对应的地下水埋深存在差异, 这与各生育阶段内小麦的根系生长、对包气带内水分的消耗量等因素相关^[13, 19]。

表 2 试验期间不同地下水埋深下关键气象要素变化

Table 2 Growthseasonal change of key meteorological elements atfour groundwater levels

埋深/m	生育阶段	气温/℃	空气湿度/%	太阳辐射/(W·m ⁻²)	净辐射/(W·m ⁻²)	土壤热通量/(W·m ⁻²)	大气压力/hPa	风速/(m·s ⁻¹)	降水量/mm
0.5, 2.0	初期	7.99	0.75	94.57	34.28	-48.26	1 014.21	0.72	11.72
	发育期	5.66	0.86	78.63	44.70	-21.62	1 011.77	1.19	68.60
	中期	14.75	0.73	194.66	118.68	32.16	1 007.97	1.39	27.20
	后期	23.05	0.71	217.54	137.92	64.56	997.06	1.45	8.60
1.0	初期	3.23	0.81	66.73	23.97	-50.41	1 024.51	1.23	29.80
	发育期	7.82	0.83	128.89	51.65	10.43	1 019.05	1.44	81.80
	中期	16.66	0.78	193.24	72.17	32.34	1 012.37	1.31	34.60
3.0	后期	20.61	0.90	143.90	57.71	32.89	1 007.00	1.13	143.80
	初期	5.45	0.87	71.32	26.71	-48.83	1 024.79	1.16	121.00
	发育期	5.86	0.78	99.97	38.70	-11.87	1 020.50	1.20	63.00
	中期	14.69	0.66	146.95	62.35	33.06	1 012.38	1.17	68.40
	后期	21.29	0.57	165.78	79.93	47.26	1 008.14	1.00	7.40

全生育期内各埋深 (0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m) 小麦蒸散量依次为 510.50, 499.33, 567.88, 727.88 mm, 土壤水与地下水交换量 (潜水蒸发量-潜水入渗量) 依次为 130.00, 150.88, 70.91, -20.77 mm, 0~20 cm 土层蓄水量依次为 -52.29, -58.15, -31.97, -35.13 mm。小麦蒸散对降水的利用率 (降水量/蒸散量) 为 22.74%、58.04%、20.40%、35.69%。地下水埋深 3.0 m 时, 小麦蒸散发以消耗土壤水为主, 对降水利用率较高。地下水埋深 0.5, 1.0, 2.0 m 时, 小麦蒸散发同时消耗土壤水和地下水。尤其在地下水埋深 1.0 m 时, 潜水蒸发量最大, 表层土壤蒸发也最大, 对降水的利用率也达到最大。此外, 1.0 m 埋深对地下水消耗量相对较大, 这可能与淮北平原区小麦生长的最适埋深相关^[19-20]。

为进一步探索不同生育阶段土壤水分对小麦耗

水机理的影响, 以旬为时间步长, 以地表以下 10 cm 处土壤含水率表示地表土壤水分的变化, 绘制不同地下水埋深下小麦地表土壤水分变化过程线。为消除不同蒸渗仪埋设土壤水分传感器的系统误差, 将土壤水分数据进行归一化处理, 见图 3。地下水埋深为 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m 时, 表层含水率的方差依次为: 0.26, 0.25, 0.25, 0.18。地下水埋深 3.0 m 时, 表层土壤水分变幅显著小于其他三种埋深。地下水埋深较深, 潜水运动距离相对较长, 地下深层土壤水和地下水不能及时向上运移补给表层水分。此外, 小麦根系长度最长约达 2.0 m, 当地下水埋深降至 3.0 m 时, 根系提水作用及吸水速率减缓, 故表层土壤水分对外界环境的响应延迟^[21-22]。地下水埋深为 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m 时, 土壤水分与小麦蒸散量的相关系数依次为 -0.42, -0.69,

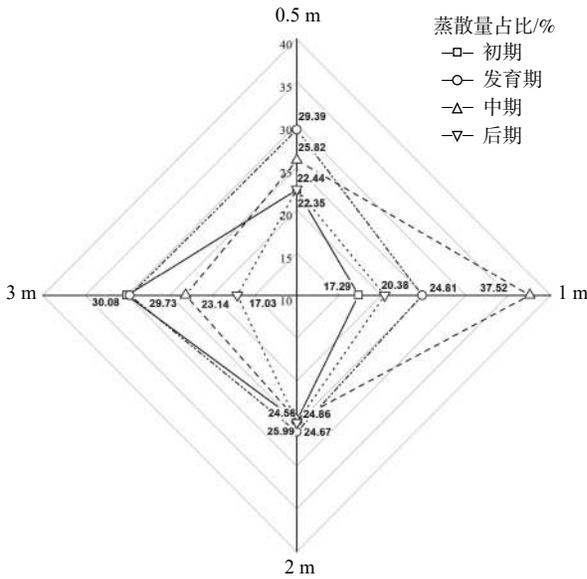


图 2 各生育阶段不同地下水埋深下冬小麦蒸散量占比雷达图
 Fig. 2 Radar map of wheat evapotranspiration ratio at four groundwater levels during four growth stages

-0.53, -0.43。表层土壤水是蒸散发的主要来源, 在地下水埋深 1.0, 2.0 m 时, 表层土壤水对蒸散贡献率相对更高。

冬小麦的日蒸散量变化过程见图 4。各地下水埋深间蒸散量相关系数均达 0.72 以上, 这表明蒸散发的

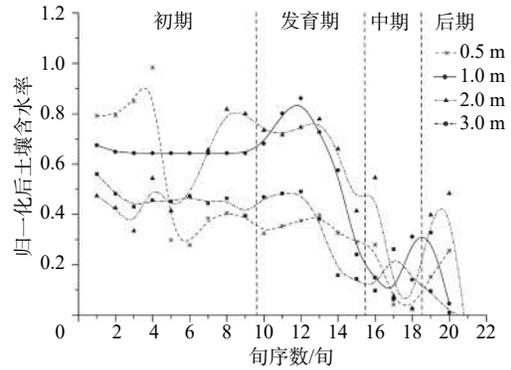
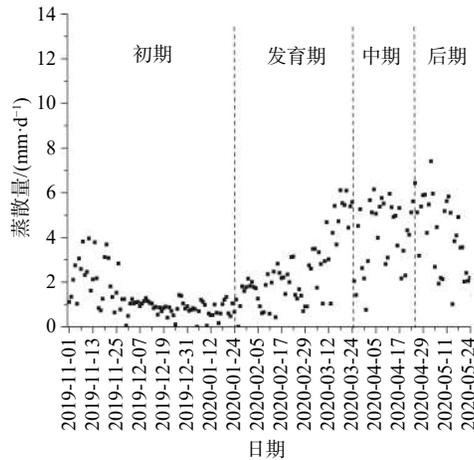
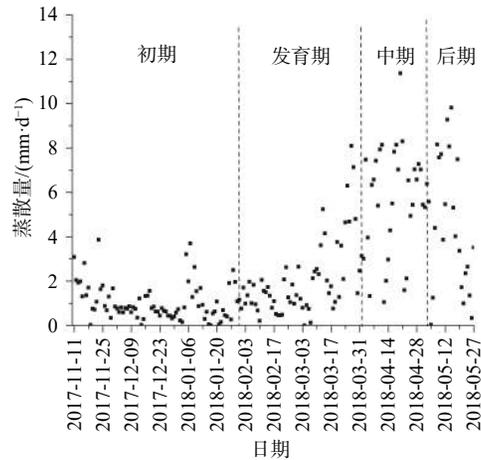


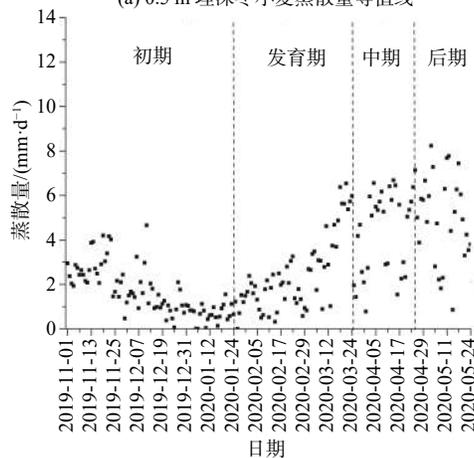
图 3 不同地下水埋深下全生育期冬小麦地表土壤水分变化过程
 Fig. 3 Change of standardized topsoil moisture during wheat seasons at four groundwater levels



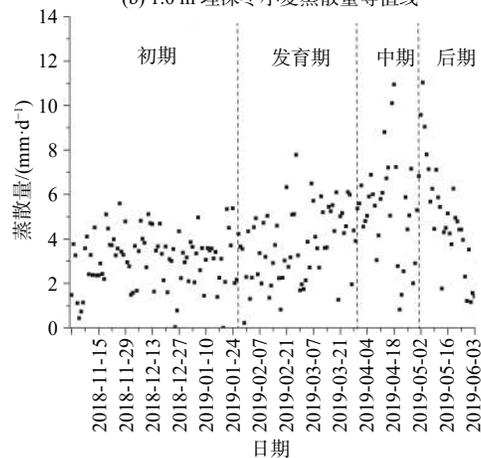
(a) 0.5 m 埋深冬小麦蒸散量等值线



(b) 1.0 m 埋深冬小麦蒸散量等值线



(c) 2.0 m 埋深冬小麦蒸散量等值线



(d) 3.0 m 埋深冬小麦蒸散量等值线

图 4 不同地下水埋深下冬小麦蒸散量变化过程线

Fig. 4 The change of wheat evapotranspiration at four groundwater levels

日变化过程是小麦生长内在因子和大气要素综合影响的结果,即使播种时间不一,但受小麦内在生长驱动,蒸散量的趋势大致相似。生长初期,气温较低,田间基本无植被覆盖,小麦耗水量少;发育初期,小麦返青基本结束,而后开始拔节,耗水量逐渐增加并出现该阶段的耗水峰值;中期,小麦处于孕穗、灌浆状态,耗水量增大并达到全生育期耗水峰值;后期,小麦接近成熟,耗水量逐渐减少。此外,地下水埋深 3.0 m,生长初期的小麦蒸散量在 2~4 mm/d 变化,稍大于其余三种埋深。这与不同生育阶段小麦蒸散量在全生育期内分配的结论相一致。

2.2 不同地下水埋深下典型日冬小麦蒸散强度变化
水文气象要素对小麦蒸散量的影响较大。全生

育期内小麦逐日蒸散量与气象因子相关性,见表 3。假定相关系数小于 0.3 时两者基本不相关。对小麦蒸散量影响较大的气象要素依次为:太阳辐射、净辐射、土壤热通量、平均气温和空气湿度(统称关键气象因子)。大气压力和风速对其影响较弱。三项辐射因子和气温均对蒸散量正向驱动,空气湿度反之,与王胜^[23]的研究结论一致。水面蒸发量综合反映了天气特征及蒸发能力^[24-27],不同地下水埋深下蒸散量与水面蒸发的变化一致。选择地面以下 10, 30 cm 处地温反映地表的热量情况,结果表明地表温度的升高引起蒸散量的增加,且 10 cm 处地温对蒸散的正向驱动大于 30 cm 处。在地下水埋深浅时(地下水位<3.0 m)地表与蒸散的相关性较强。

表 3 不同地下水埋深下全生育期冬小麦蒸散量与水文气象要素相关系数

Table 3 Correlation coefficient between wheat evapotranspiration and hydrometeorological factors in the whole growth period at four groundwater levels

地下水埋深/m	平均气温/℃	空气湿度/%	太阳辐射/(W·m ⁻²)	净辐射/(W·m ⁻²)	土壤热通量/(W·m ⁻²)	大气压力/hPa	风速/(m·s ⁻¹)	水面蒸发/mm	10 cm 处地温/℃	30 cm 处地温/℃
0.5	0.65	-0.51	0.82	0.81	0.69	-0.06	0.29	0.62	0.59	0.52
1.0	0.64	-0.57	0.70	0.68	0.68	-0.26	-0.09	0.52	0.69	0.65
2.0	0.73	-0.60	0.85	0.84	0.71	-0.02	0.27	0.67	0.66	0.61
3.0	0.26	-0.28	0.52	0.56	0.42	-0.21	-0.08	0.33	0.22	0.18

基于小麦蒸散量与气象因子的相关性分析,太阳辐射与蒸散量的相关系数最大。以三季小麦生长期内太阳辐射量为统计样本,通过 k-means 算法聚类(图 5),将小麦生长期内太阳辐射分为 3 类(类别名-聚类中心/(W/m²)-划分区间/(W/m²):强太阳辐射-218.68-(122.53,322.82]、弱太阳辐射-121.57-(60.60,122.53]、微弱太阳辐射-49.88-[6.31,60.60]。

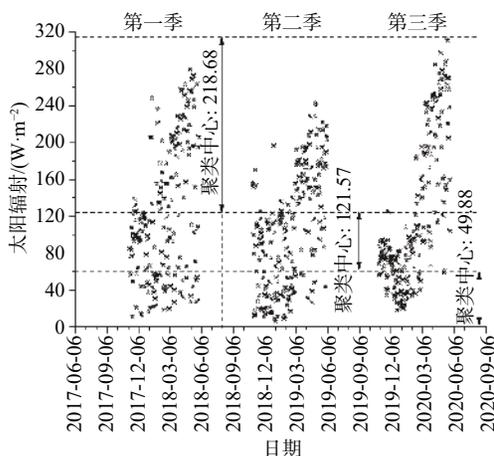


图 5 冬小麦试验期间太阳辐射变化过程
Fig. 5 Dailychange of solar radiation during wheat season

以每类的聚类中心为圆心,逐渐向外发散寻找典

型日,以各地下水埋深典型日之间气象环境相似为结束标记。选定的典型日如下:

(1)强太阳辐射:地下水埋深 0.5, 2.0 mm 时,生长季内选择 2020 年 4 月 26 日为典型日,当天辐射量为 218.54 W/m²;地下水埋深 1.0 m 时,生长季内选择 2018 年 4 月 29 日为典型日,当天辐射量为 219.59 W/m²;地下水埋深 3.0 m 时,生长季内选择 2019 年 4 月 17 日为典型日,当天辐射量为 228.73 W/m²。

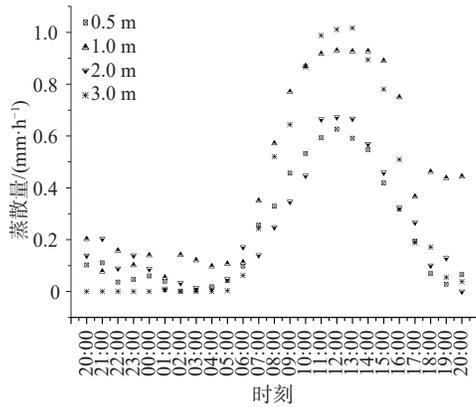
(2)弱太阳辐射:地下水埋深 0.5, 2.0 m 时,生长季内选择 2020 年 2 月 18 日为典型日,当天辐射量为辐射量 133.79 W/m²;地下水埋深 1.0 m 时,生长季内选择 2018 年 2 月 25 日为典型日,当天辐射量为 119.64 W/m²;地下水埋深 3.0 m 时,生长季内选择 2019 年 9 月 25 日为典型日,当天辐射量为 121.50 W/m²。

(3)微弱太阳辐射:地下水埋深 0.5, 2.0 m 时,生长季内选择 2019 年 12 月 20 日为典型日,当天辐射量为 50.75 W/m²;地下水埋深 1.0 m 时,生长季内选择 2017 年 12 月 23 日为典型日,当天辐射量为 43.81 W/m²;地下水埋深 3.0 m 时,生长季内选择 2018 年 11 月 30 日为典型日,当天辐射量为 52.84 W/m²。

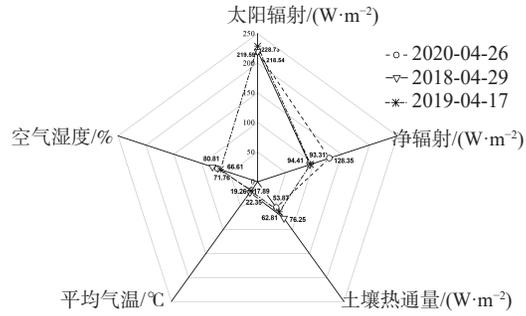
各类典型日的气象要素雷达图和小麦蒸散强度

变化过程见图 6, 描绘时段为当日 20:00—翌日 20:00。气象要素雷达图展示了各类典型日内关键气象因子的分布, 各类典型日间大气环境相似。三类典型日内不同地下水埋深的蒸散强度变化规律一致, 随太阳辐射由强到微弱, 典型日内平均蒸散强度依次为 0.30, 0.07, 0.03 mm/h。蒸散强度与太阳辐射强度呈正相关。蒸散峰历时(指蒸散强度由起涨至峰值再回落到起涨状态所经历的时间)依次为 5:00—20:00、7:00—

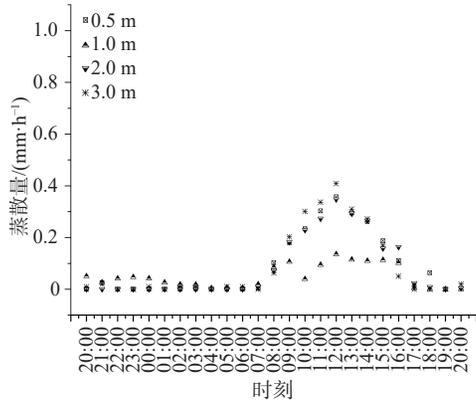
17:00 和 9:00—17:00, 强辐射日内蒸散峰持续时长明显大于弱辐射日。强辐射日和弱辐射日内各埋深峰值均约 12:00 出现, 但微弱辐射日内地下水埋深 3.0 m 时, 峰值则明显滞后, 约 13:00 出现, 其余埋深均约 12:00 出现。这可能因为当太阳辐射较强时, 包气带厚度对蒸散强度峰值出现时间的影响较小; 当太阳辐射较弱时, 地下水埋深过大、包气带过厚会阻滞能量的传输, 致使蒸散强度峰值滞后。



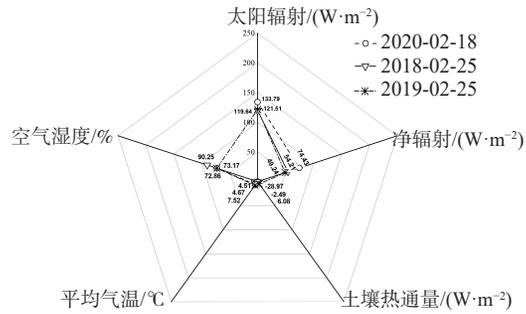
(a) 强太阳辐射典型日内小麦蒸散强度变化



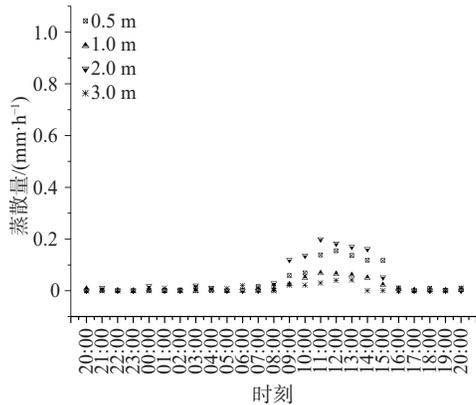
(b) 强太阳辐射典型日气象要素雷达图



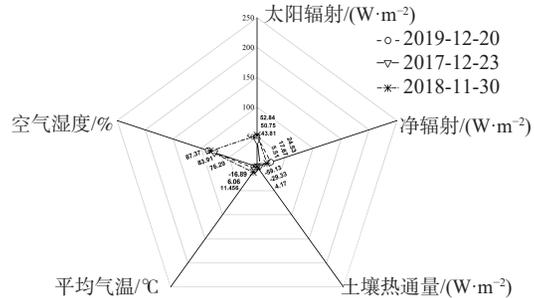
(c) 弱太阳辐射典型日内小麦蒸散强度变化



(d) 弱太阳辐射典型日气象要素雷达图



(e) 微弱太阳辐射典型日内小麦蒸散强度变化



(f) 微弱太阳辐射典型日气象要素雷达图

图 6 典型日气象要素雷达图和小麦蒸散强度变化过程

Fig. 6 Change of meteorological elements and the hourly process of wheat evapotranspiration in the typical days

3 讨论

地下水埋深对作物耗水的影响不仅体现在耗水量,还包括耗水来源的差异。淮北平原属地下水浅埋区,小麦生长同时利用土壤水和地下水。但当地下水埋深降至 3.0 m 以下,在越冬阶段,小麦基本仅使用土壤水,地下水消耗量接近 0。这与王振龙等^[13,19]在五道沟实验站利用地中蒸渗仪群观测潜水蒸发量所得结果一致:砂姜黑土区地下水埋深超过 2.5 m 时,潜水蒸发量接近 0,即对地下水消耗量为 0。王晶晶^[22]利用稳定氢氧同位素技术分析华北平原冬小麦水分利用策略:全生育期小麦蒸腾耗水集中在 0~40 cm 表层土壤水,苗期主要消耗 10~20 cm 处土壤水。蒸散发是作物蒸腾与土壤蒸发两种失水过程的结合。淮北平原小麦根系浅,若经历持续干旱,地下水埋深下降后,地下水对上层土壤水和根系的补给量均较小,小麦主要消耗表层土壤水。若暴雨过后,地下水埋深抬升过高,受涝时间过长会严重影响小麦的生长,根系吸水能力受损^[25]。

作物耗水与地下水埋深的关系研究在干旱地区开展较多。这种关系不仅局限于地下水埋深对作物耗水的单向影响,还包括两者间双向影响。地下水埋深对作物耗水起调节作用,而作物耗水也会引起地下水位持续下降^[20,24]。干旱地区作物主要消耗浅层地下水,占总蒸散量比重很大^[2]。该比重会随地下水埋深变浅、气候干旱而增大。当干旱持续较长,浅层根系作物会因水分亏缺而暂时缺失活性、蒸腾减少,表层土壤主要消耗于蒸发;深层根系会依据土壤水分的变化不断向下索取水分^[21]。作物蒸散发与地下水间的关系多呈非线性关系。同时,在多个研究中都发现存在临界深度,使得大于该深度时地下水对蒸腾没有贡献^[2,24-27]。在干旱地区,地下水位多通过水位井动态监测,以地下水位的变化或土壤水分模拟蒸散量。本试验是利用定埋深的大型称重式蒸渗仪监测作物蒸散量。蒸渗仪作为目前国际上测量蒸散量较为精准的仪器,在单向比较地下水埋深对蒸散量的影响研究中有一定的优势,但本试验中蒸渗仪因地下水位无法动态变化不能进行反向蒸散量对地下水埋深影响的研究。故后续在淮北平原可结合大田水井与蒸渗仪试验相结合的形式讨论地下水埋深与蒸散量的双向关系。

4 结论

(1)小麦生育阶段初期和中期各埋深耗水占比差

异较大,发育期和后期各埋深间耗水占比差距较小。小麦生育阶段初期和发育期占比最大值均出现在地下水埋深 3.0 m 时,中期占比最大值出现在地下水埋深 1.0 m,后期最大值出现在地下水埋深 2.0 m。

(2)地下水埋深 0.5, 1.0, 2.0 m 时,小麦蒸散主要消耗土壤水和地下水,表层土壤水对地下水埋深 1.0, 2.0 m 蒸散相对贡献率更高。地下水埋深 3.0 m 蒸散主要消耗土壤水,其表层土壤水对外界气象环境的响应存在明显滞后。

(3)太阳辐射、净辐射和土壤热通量对小麦蒸散影响较大。依据与蒸散发关联最密切的太阳辐射划分强/弱/微弱三类典型日。随太阳辐射由强到微弱,每类典型日内平均蒸散强度依次减小、蒸散峰逐渐延迟、蒸散峰历时的时长显著减小。

参考文献 (References) :

- [1] 易小波,邵明安,袁国富,等.塔里木河下游植被空间分布特征及其用水策略[J].北京林业大学学报,2017,39(5):1-8. [YI Xiaobo, SHAO Mingan, YUAN Guofu, et al. Spatial distribution of vegetation and its strategy in using water in the lower reaches of the Tarim River, western China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(5): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 赵鹏,李思恩,郭维华,等.西北干旱地区葡萄园作物耗水规律研究[J].灌溉排水学报,2015,34(6):68-72. [ZHAO Peng, LI Sien, GUO Weihua, et al. Characteristics of crop water consumption in vineyard in arid regions of northwestern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 68-72. (in Chinese with English abstract)]
- [3] DANG H Z, LU P, YANG W B, et al. Drought-induced reductions and limited recovery in the radial growth, transpiration, and canopy stomatal conductance of Mongolian Scots pine: a five-year observation[J]. Forests, 2019, 10(12): 1-16.
- [4] HUANG J T, ZHOU Y X, WENNINGER J, et al. How water use of Salix psammophila bush depends on groundwater depth in a semi-desert area[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(7): 1-13.
- [5] 贾伍慧,尹立河,王晓勇,等.利用改进的Loheide方法计算地下水的蒸散发量[J].水文地质工程地质,2017,44(2):48-51. [JIA Wuhui, YIN Lihe, WANG Xiaoyong, et al. Quantifying groundwater evapotranspiration by the modified loheide method[J].

- Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 48 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张经天, 席海洋, 王春林, 等. 基于地下水位变化的荒漠河岸林蒸散估算[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 179 – 186. [ZHANG Jingtian, XI Haiyang, WANG Chunlin, et al. Estimation of evapotranspiration of riparian forests in the desert region from diurnal fluctuation of groundwater levels[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(1): 179 – 186. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 黄金廷. 半干旱区蒸散发对地下水变化响应机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. [HUANG Jinting. The Response of evapotranspiration to the groundwater changes in the semi-arid area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [8] DE DEURWAERDER H, HERVÉ-FERNÁNDEZ P, STAHL C, et al. Liana and tree below-ground water competition—evidence for water resource partitioning during the dry season[J]. *Tree Physiology*, 2018, 38(7): 1071 – 1083.
- [9] 张晓萌. 安徽淮北平原土壤水分变化特征及其与地下水转化关系研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019. [ZHANG Xiaomeng. Variation characteristics of soil moisture variation and its relationship with groundwater transformation in Huaibei plain of Anhui Province[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [10] LUO X Y, LIANG X, LIN J S. Plant transpiration and groundwater dynamics in water-limited climates: Impacts of hydraulic redistribution[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(6): 4416 – 4437.
- [11] 王胜, 田红, 党修伍, 等. 安徽淮北平原冬小麦气候适宜度分析及作物年景评估[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(3): 253 – 261. [WANG Sheng, TIAN Hong, DANG Xiuwu, et al. Research on the climate suitability and agricultural climate yields assessment of winter wheat in Huaibei plain of Anhui Province[J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(3): 253 – 261. (in Chinese with English abstract)]
- [12] WANG Z, LEO M, ZHU M, et al. Comparatively study water sensitivity index of the winter wheat for different groundwater depth in Shajiang black soil area and yellow fluvo-acquic soil area[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 525(1): 1 – 11.
- [13] 王振龙, 杨秒, 吕海深, 等. 基于蒸渗仪群淮北平原冻融期裸土及麦田潜水蒸发规律研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 129 – 137. [WANG Zhenlong, YANG Miao, LYU Haishen, et al. Phreatic evaporation in bare and wheat land during freezing-thawing period of Huaibei Plain based on lysimeters experiments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13): 129 – 137. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 耿思敏. 面向作物因旱产量损失最小化的农业水资源配置研究[D]. 北京: 清华大学, 2017. [GENG Simin. Study on the allocation of agricultural water resources oriented the minimization of crop yield loss caused by drought[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [15] CUI Y, JIANG S M, JIN J L, et al. Decision-making of irrigation scheme for soybeans in the Huaibei plain based on grey entropy weight and grey relation—projection pursuit[J]. *Entropy*, 2019, 21(9): 877.
- [16] 王振龙, 顾南, 吕海深, 等. 基于温度效应的作物系数及蒸散量计算方法[J]. *水利学报*, 2019, 50(2): 242 – 251. [WANG Zhenlong, GU Nan, LYU Haishen, et al. Calculation of crop coefficient and evapotranspiration based on temperature effect[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(2): 242 – 251. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [18] 张建萍, 刘希玉. 基于聚类分析的K-means算法研究及应用[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(5): 166 – 168. [ZHANG Jianping, LIU Xiyu. Application in cluster's analysis is analyzed in children development period[J]. *Application Research of Computers*, 2007, 24(5): 166 – 168. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王振龙, 刘森, 李瑞. 淮北平原有无作物生长条件下潜水蒸发规律试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 26 – 32. [WANG Zhenlong, LIU Miao, LI Rui. Experiment on phreatic evaporation of bare soil and soil with crop in Huaibei plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(6): 26 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [20] RICHARD A, GALLE S, DESCLOITRES M, et al. Interplay of riparian forest and groundwater in the hillslope hydrology of Sudanian West Africa (northern Benin)[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(12): 5079 – 5096.

- [21] 赵楠, 王尚涛, 朱高峰, 等. 额济纳旗怪柳林土壤水分动态变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(5): 189 – 195. [ZHAO Nan, WANG Shangtao, ZHU Gaofeng, et al. Study on soil moisture dynamics of Tamarix shrubs in Ejina Banner[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(5): 189 – 195. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王晶晶. 土壤作物系统中水分及其氢氧稳定同位素的动态与农田耗水特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. [WANG Jingjing. Dynamics of soil water and deuterium and oxygen-18Stable isotopes in soil-crop system and field water consumption characteristics[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王胜. 水蚀风蚀交错区典型乔灌树种蒸腾耗水特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2019. [WANG Sheng. Transpiration characteristics of typical shrub and tree species in the water-wind erosion crisscross region, China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [24] MCDONALD A K, WILCOX B P, MOORE G W, et al. Tamarix transpiration along a semiarid river has negligible impact on water resources[J]. [Water Resources Research](#), 2015, 51(7): 5117 – 5127.
- [25] 刘思敏. 安徽淮北平原暴雨事件演变规律及作物雨涝风险分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2017. [LIU Simin. Evolvement of rainstorm event and risk analysis of crop waterlogging in Huaibei plain of Anhui Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 等. 基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 45-52. [GUO Xiaotong, MENG Dan, JIANG Bowu, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3):45-52.(in Chinese with English abstract)]
- [27] 黄金廷, 李宗泽, 王文科, 等. 格尔木河流域水面蒸发特征及影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 31-37. [HUANG Jinting, LI Zongze, WANG Wenke, et al. Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River catchment [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48 (3): 31-37. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳