

DOI:10.12170/20210315002

黄爱明, 顾南, 胡永胜, 等. 以降水为基础的淮北浅埋区涝渍分析与评价 [J]. 水利水运工程学报, 2022(2): 21-30. (HUANG Aiming, GU Nan, HU Yongsheng, et al. Evaluation of waterlogging in Huaibei plain based on precipitation analysis[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(2): 21-30. (in Chinese))

以降水为基础的淮北浅埋区涝渍分析与评价

黄爱明^{1,2}, 顾南^{1,2,3}, 胡永胜⁴, 闫浩芳^{2,3,5}, 杜明成^{2,3}, 王国庆^{2,3}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏南京 210029; 3. 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 210029; 4. 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; 5. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏镇江 212013)

摘要: 淮北平原涝渍灾害严重, 研究淮北浅埋区的地下水埋深对降水的响应规律及涝渍评价方法, 对科学规划区域排涝减灾及农作物增产具有重要意义。基于五道沟实验站 32 年的日降水、地下水埋深及土壤水分数据, 利用数理统计的方法分析了五道沟实验站降水、地下水埋深变化特征, 同时分析了作物和不同雨强的降水对地下水埋深的影响。利用正距平法和 Z 指数法对五道沟实验站涝情进行评价。结果表明: 淮北浅埋区的年内降水主要集中在 5—9 月; 作物生长前期需水少, 降水补给量决定了地下水水位的增长幅度, 后期需水量过大, 地下水水位会持续下降; 地下水埋深在年内呈现双峰变化, 在地下水浅埋区, 地下水埋深对一定范围内的降水具有弹性; 对比不同雨强下地下水水位的响应时间发现, 随着雨强的增大, 地下水水位的响应时间逐渐减小; 两种方法均能较好评价淮北浅埋区的涝渍情况, 但长期无降水、地下水水位过低时会高估受涝渍灾害的严重性, 且 Z 指数法高估程度更明显。

关键词: 淮北平原; 降水; 地下水埋深特征; 涝渍分析; 作物

中图分类号: TV11

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)02-0021-10

涝渍灾害是指地表长期滞水或遭受地下水浸渍, 影响作物生长或危及作物存活而产生的一种灾害。其影响因素主要为降水、地形地貌、土壤特性等, 降水为最活跃的致灾因子。降水是水循环过程中重要的一个环节^[1]。近几年来, 全球气候变暖加剧, 全球范围内洪水发生越来越频繁。位于中国南北气候过渡带的淮北平原, 不仅是安徽省及全国重要的粮食生产加工基地, 也是气候变化响应的重要地区^[2]。有研究表明, 1955—2015 年淮北平原年降水量明显增加^[3]。地势低洼的淮北平原, 频繁的降水及透水性差的大面积的砂姜黑土, 导致该地区旱涝灾害发生频率高^[4]。

目前, 国内外研究中涝渍评价指标种类繁多, 以气候指标为研究核心是农业气象领域中常用的方法。常用的有降水距平百分率^[5]、Z 指数法^[6]和 SPI^[7]指标。Shao 等^[8]将 SPI 法应用于美国墨西哥湾沿岸地区的受涝情况分析。Tahroudi 等^[9]将改进的降水距平百分率法应用于乌尔米亚湖东南部的扎里内罗流域的涝渍评价。我国也有学者对涝渍分析进行了研究, 葛岩等^[10]将 Z 指数法应用于我国西北地区, 并根据西北地区实际情况对 Z 指数法进行修正。贺音等^[11]在我国陕西省采用降水距平百分率、标准化降水指数和相对湿润干旱指数 3 种指标进行干旱动态监测, 发现在春、冬季降水距平百分率指标适用性好。但对以地下水开采为主的淮北地区, 此类研究偏少。为分析淮北平原降水对涝渍的影响, 本文使用五道沟实验站 1986—

收稿日期: 2021-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41830863, 51879162); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基金项目(2020nkzd01)

作者简介: 黄爱明(1996—), 女, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源模拟研究。E-mail: 873577052@qq.com
通信作者: 王国庆(E-mail: gqwang@nhri.cn)

2018 年(缺 2000 年)共 32 年的日降水、地下水埋深等资料,总结降水及地下水埋深的特征,并分析降水与地下水埋深的关系及作物对地下水埋深的影响,在此基础上利用降水距平百分率中的正距平法和考虑了降雨量服从偏态分布的 Z 指数法^[12]对淮北平原涝渍情况进行评价,以期为淮北平原浅埋区农田除水排涝及农业生产提供技术支持。

1 区域概况及方法

五道沟试验站是一个大型综合实验站,地处东经 117.3,北纬 33.32,位于安徽淮北平原的南部,所在地区属于典型的半干旱半湿润季风气候南北过渡区,四季分明,冬季干旱少雨,夏季炎热多雨^[13]。利用 Food and Agriculture Organization (FAO)提供的世界土壤类型提取出淮北平原的土壤类型及五道沟试验站所处位置(图 1),其主要土壤为饱和潜育土(Ge)和松软潜育土(Gm)。该实验站气象方面主要开展与水文实验研究相关的气象要素观测:水面蒸发量、降水量、空气温度、日照、风向风速等,也监测地下水位、土壤埋深等数据。该地区多年平均降水量为 899.0 mm,多年平均气温 14.7 °C,多年平均日照时数 1 852.1 h,多年平均风速(地面上 1.5 m 高度) 2.1 m/s,多年平均地表温度 17.9 °C^[14-15]。

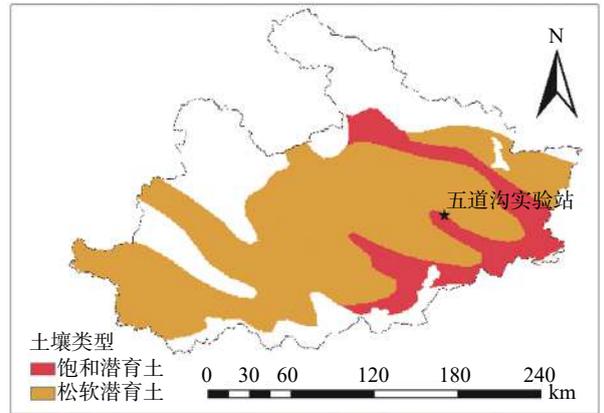


图 1 五道沟实验站地理位置及土壤类型

Fig. 1 Geographic location map of Wudaogou Experimental Station

雨量分析法所需材料易得,计算方法简单,但仅能反映降水量的相对多少,不能直接反映作物受灾的程度^[4]。大于多年平均值的各年某时段(旬、月、季或作物某一生育阶段)降水与该时段多年平均值之差称为正距平。将正距平的平均值称为平均正距平,计算式分别用式(1)和(2)表示:

$$d = P_i - \bar{P} \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}) \quad (2)$$

式中: d 为某时段第 i 年降水距平 (mm); P_i 为某时段第 i 年降水量 (mm); \bar{P} 为某时段多年平均降水量 (mm); D 为某时段降水正距平多年平均值 (mm); N 为某时段内降水距平为正的年数。

定义判定系数 K 为 d 与 D 之比,一般规定 $0 < K \leq 1$ 为正常, $1 < K \leq 2$ 为涝, $K > 2$ 为大涝。

Z 指数法考虑了降水的偏态分布,并进行处理而得到服从标准正态分布的降水系列,消除了不同时空尺度降水量平均值不同而造成的误差^[16]。其计算式如下:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s \phi_i}{2} + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (3)$$

式中: C_s 为偏态系数, $C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^3}{n\sigma^3}$, σ 为标准差;

ϕ_i 为标准化变量, $\phi_i = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma}$ 。

鞠笑生等^[17]根据 Z 变量的正态分布曲线,划分旱涝等级并界定相应的 Z 值(表 1)。

表 1 以 Z 值为指标划分旱涝等级

Tab. 1 Classified drought and flood levels by Z value

等级	Z 指数	类型
1	$Z > 1.645$	极涝
2	$1.037 < Z \leq 1.645$	大涝
3	$0.842 < Z \leq 1.037$	偏涝
4	$-0.842 < Z \leq 0.842$	接近正常
5	$-1.037 < Z \leq -0.842$	偏旱
6	$-1.645 < Z \leq -1.037$	大旱
7	$Z \leq -1.645$	极旱

2 数据处理

2.1 降水特征分析

图 2 反映了五道沟气象站从 1986—2018 年的年降水量变化过程, 降水量最大值(1 416.2 mm)出现在 2003 年, 最小值(508.9 mm)出现在 2001 年, 多年降水量均值为 933.11 mm。从图 2 中也可以看到, 1986—2018 年, 当地降水量呈不显著上升趋势, 并且在 2010 年之后降水量呈显著上升。

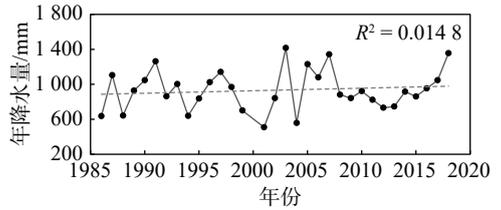


图 2 1986—2018 年五道沟气象站降水量变化过程
Fig. 2 The precipitation change process of Wudaogou Meteorological Station from 1986 to 2018

降水的持续性通常指一场降水持续的时间(以天计)^[4]。对五道沟 32 年日降水资料进行统计, 分析表明: 五道沟实验站平均降水次数为 45.9 次/a, 从月分布上看, 五道沟实验站的降水主要集中在 5—9 月, 该站 5—9 月的多年平均降水次数为 22.8 次, 降水次数占多年降水总次数的 71.4%; 从降水过程持续时间看, 五道沟实验站持续时间 1~5 d 的降水平均每年发生 44.6 次, 发生次数占总次数的 97.2%。1~5 d 的降水是淮北浅埋区发生频率最高的降水持续时间。

降水过程的密集度用相邻两次降水之间的间隔期表示^[18]。根据五道沟实验站 32 年日降水资料可见, 从月份上看, 6、7、8 月是降水密集期。在这 3 个月中, 五道沟实验站平均每年降水 15.2 次, 每两场降雨平均间隔 4 d。从季节上看, 春夏为作物的生长发育季节, 此期间的降水过程密集度对作物产量影响巨大。春夏季(3—8 月), 降雨间隔期为 1~3 d 的多过程降水五道沟实验站为平均 13.9 次/a; 间隔期为 1~7 d 的多过程降水五道沟实验站为平均 22.3 次/a。

2.2 地下水埋深动态变化

2.2.1 地下水埋深的年内与年际变化 根据 1986—2018 年多年地下水位计算出地下水埋深数据, 分析其年内和年际变化特征。地下水埋深及其变异系数的年内变化如图 3 所示。可见: 地下水埋深呈现双峰变化, 两次峰值分别出现在 3 月和 7 月, 即地下水水位达到极大值。不同月份内的地下水埋深的变异系数与埋深变化呈明显的负相关趋势。埋深小的时期, 变异系数大; 埋深大时, 则反之。这表明地下水水位高的时期, 地下水水位波动大。春、夏、秋、冬季的平均地下水埋深为 1.88、1.64、1.68、1.83 m, 变异系数依次为 0.47、0.58、0.57、0.53。夏、秋季地下水水位较高, 变幅较大。春、冬季地下水水位较低, 变幅较小。

地下水埋深的年际变化如图 4 所示。大致可将 1986—2018 年间的地下水埋深变化过程划分为 3 个阶段: 第一阶段(1986—1998 年), 呈现缓慢下降趋势, 减少幅度为 0.04 m/a; 第二阶段(1998—2004 年), 地下水埋深变化十分震荡, 2001 年地下水水位降至最低, 2003 年升至最高, 同期降水也相应达到最大/小; 第三阶段(2005—2018 年), 呈缓慢上升趋势, 上升幅度为 0.03 m/a。第一阶段与第二阶段地下水水位的年际差异较小, 而第二阶段则发生突变。这表明在地下水浅埋区, 地下水埋深对一定范围内的降雨具有弹性。分析实验站历年降水, 大致确定地下水埋深对其响应及时的范围为 [600, 1 200](单位: mm)。在该范围内的降雨, 地下水水位会迅速响应。对于该超出范围的降雨, 地下水水位则恢复较慢。

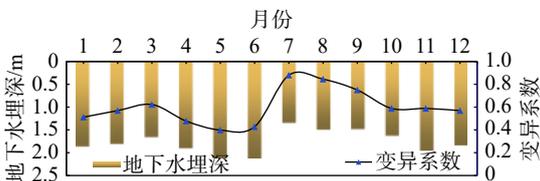


图 3 1986—2018 年五道沟地下水埋深年内分配
Fig. 3 Annual distribution of groundwater depth in Wudaogou from 1986 to 2018

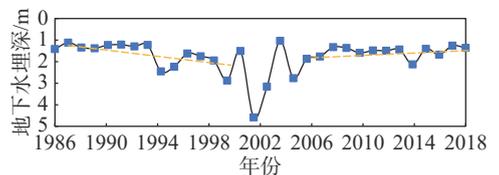


图 4 1986—2018 年五道沟地下水埋深多年过程
Fig. 4 Multi-year process chart of groundwater buried depth in Wudaogou from 1986 to 2018

2.2.2 作物对地下水埋深的影响 使用测量频率为 1 次/d 的地下水埋深数据,以 1 d 为步长绘制地下水埋深图分析作物对地下水埋深的影响(图 5 和 6)。夏玉米生长季内多年平均地下水埋深变化过程(图 5)显示:整个玉米生长季地下水埋深在 [1.11, 2.37](单位:m)范围内波动,呈“先增后减”的趋势;6 月下旬地下水水位最低,7 月下旬水位达到最高后逐渐降低,8 月下旬后相对平稳。前期埋深增加的速率约为 0.02 m/d,约持续 44 d;后期降低速率约为 0.02 m/d,约持续 28 d。6—7 月份地下水水位持续上升,该时段为作物生长初期,蒸散量小,降雨集中,引起地下水水位持续抬升。该时段内降雨对地下水水位的影响大于蒸散对其影响。7—8 月份地下水水位呈现短期的减少,该时段为作物需水旺盛期,蒸散量较大,不断消耗地下水。8 月以后,地下水水位相对稳定,该时段内需水量逐渐较少,降水也较为分散。

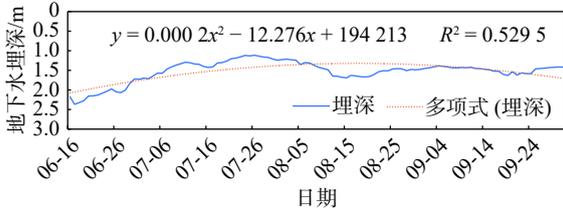


图 5 夏玉米生长季多年平均地下水埋深变化过程

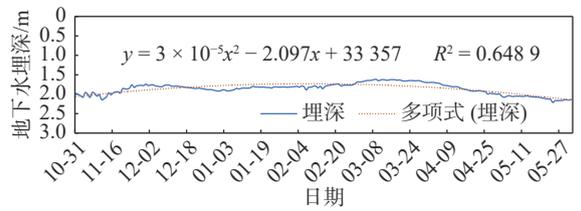


图 6 冬小麦生长季多年平均地下水埋深变化过程

Fig. 5 Multi-year average groundwater depth change process in summer maize growing season Fig. 6 Multi-year average groundwater depth change process in winter wheat growing season

冬小麦生长季内多年平均地下水埋深变化过程(图 6)显示:整个小麦生长季地下水埋深在 [1.62, 2.21](单位:m)范围内波动,地下水水位呈现小幅度的“先增后减”趋势,但总体都是围绕均值 1.86 m 波动。11 月至次年 3 月地下水水位相对稳定,该时段小麦处于越冬阶段,需水量少,且降雨稀少,主要影响包气带的储水量,对地下水的影响较小。4—5 月地下水水位降低,约 0.01 m/d,持续降低约 80 d。该时段虽降雨量稍微增大,但小麦进入抽穗和灌浆时期,需水量增大,对地下水的消耗大于降水的补给。对比冬小麦和夏玉米生长季内地下水埋深变化发现:两种作物生长季内地下水埋深均呈现“先增后减”的趋势。作物生长前期需水少、降水补给量决定了地下水水位的增长幅度,后期尽管会有降水补给,但需水量过大,导致地下水水位持续下降。

3 分析与讨论

3.1 雨强对地下水埋深的影响

选取小雨、中雨、大雨和暴雨 4 场不同级别的降雨量,分析不同雨强对地下水埋深的影响。以 2018 年实测数据为例,小雨日选取时间为 3 月 21 日—4 月 4 日,雨量为 5.5 mm。中雨日选取 7 月 9—29 日,雨量为 20.6 mm。大雨日选取 1 月 1—27 日,其中降雨时段 1 月 2—5 日降雨量分别为 0.9、16.6、12.5 和 2.5 mm。1 月 18 日降雨量为 31.6 mm。暴雨日为 8 月 4—30 日,累积降雨量为 346.8 mm。绘制不同降雨条件地下水埋深随时间变化见图 7。

图 7(a) 和 (b) 中,小雨或中雨日均为埋深较高,前期长时段无降雨情景。即使降雨 1 d,也不影响地下水水位下降的速率。分析图 7(c) 中中雨和小雨组合的情景,在 1 月 2—5 日中雨和小雨交替进行持续降雨 4 d,累积降水约 32.5 mm,虽然总降雨量较小,但仍然引起地下水水位的抬升,初期缓慢升高而后陡然升高。雨后 9 d 降雨在包气带内缓慢向下入渗,地下水水位以 0.05 m/d 的速率抬升。第 10 d 入渗的降雨运移至潜水面,地下水水位陡然以 0.38 mm/d 的速度升高。图 7(c) 中第二阶段的降雨发生在 1 月 18 日,属大雨强度。在发生二次降雨前,地下水增长的速率已从 0.38 mm/d 降至 0.11 mm/d,二次降雨发生后,新入渗的降雨与前期降雨入渗量共同维持地下水水位的稳定。但在第 6 天地下水突然抬升速率,速率为 0.52 mm/d,

而后迅速降低。第二次降雨前后水位抬高速率的变化验证了中雨强度对地下水水位的升高起到促进作用,但地下水水位对中雨的响应存在滞后。图7(d)中在8月13日发生第一次暴雨,日降雨量为84.3 mm,降雨后第3天地下水水位才对其响应,以0.57 mm/d的速率抬升。8月17日发生第二次暴雨,日降雨量为148.6 mm,第2天又降雨50.3 mm,第3天降雨14.4 mm,在第2天降雨日时,地下水水位已抬升。这个时段正好是玉米需水旺盛的时期,即使由于玉米需水旺盛,地下水水位在降雨后下降,但还是比未降雨前地下水水位高0.7 m左右,这也验证了暴雨强度的雨量对地下水水位的抬升作用。

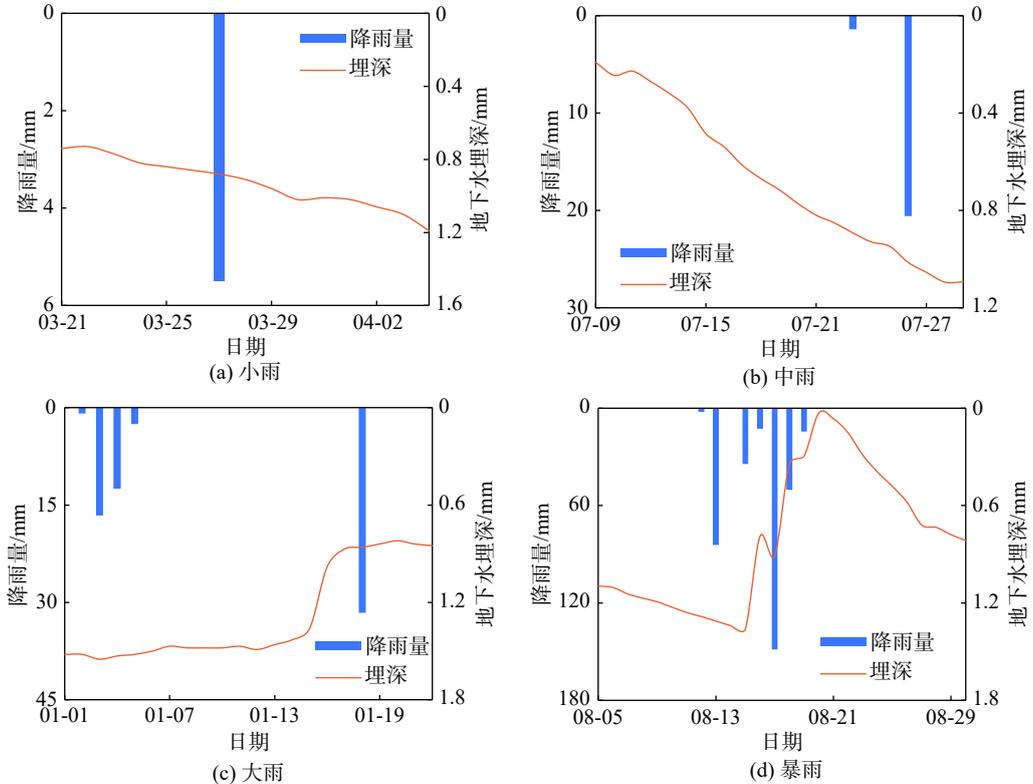


图7 不同降雨条件地下水埋深的变化

Fig. 7 Variation of groundwater depth under different rainfall conditions

综上,在前期地下水水位下降的情况下,短历时的小雨或者中雨基本不改变地下水水位原有的趋势。而当小雨或者中雨交替进行,可能会致使地下水水位的升高,但升高时间存在滞后。大雨或者暴雨强度对地下水水位的升高起促进作用,但地下水水位对降雨的响应同样存在滞后。对比不同雨强下地下水水位的响应时间发现,随着雨强的增大,地下水水位的响应时间逐渐减小。

为进一步验证上述结论,现利用2020年地下水水位自动化数据,分析小时尺度内降水对地下水水位的影响。选择位于大田中心、受外界干扰小的19#地下水观测井作为典型,从小时尺度分析降水对地下水水位的影响。降水主要集中在6、7月份,现选择2020年7月11—19日的小时降水量与地下水埋深进行分析,数据采集频率为1次/h。以3 d为步长分三段绘制图8(a),7月11日为第一场降雨,从8:00到20:00共降雨28.8 mm,属于大雨强度。8:00开始降雨,约17:00开始水位逐渐抬升,在下一场降雨前水位上升速率为0.02 m/h。7月12日开始第二场降雨,从0:00到17:00共降雨18 mm,属于中雨强度。当日地下水水位在降雨初期仍然持续以0.02 m/h的速率抬升,当日降雨结束后地下水水位保持稳定不变。7月13日无雨,地下水水位以0.01 mm/h的速率下降。从图8(b)可见,7月14日为第三场降雨,从11:00到23:00共降雨13 mm,属于中雨强度,但地下水水位没有立即抬升;7月15—16日无降雨,地下水水位基本不变。从

图 8(c) 可见, 7 月 17 日为第四场降雨, 从 10:00 到 21:00 共降雨 23.2 mm, 属于中雨强度。在 16:00, 即降雨 6 h 后, 地下水水位已经显示出上升的趋势, 以 0.01~0.02 mm/h 的速率稳健上升。7 月 18 日为第五场降雨, 从 1:00 到 5:00 共降雨 16.6 mm, 属于中雨强度。地下水水位仍以 0.01~0.02 mm/h 的速率上升, 直至 7 月 20 日下降。

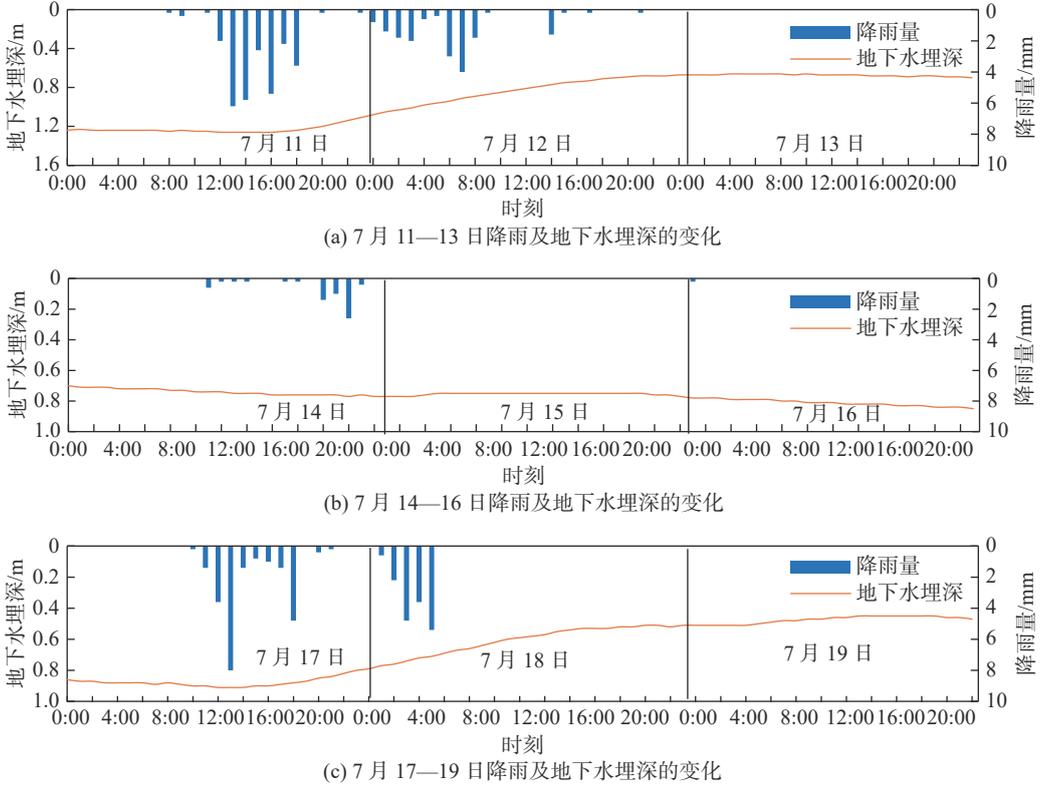


图 8 以小时为尺度的降雨对地下水埋深的影响

Fig. 8 Influence of hourly scale rainfall on groundwater depth

第一场降雨开始的第 11 个小时, 地下水水位已经开始上升。第二场降雨期间地下水水位仍然以之前的速率抬升。降水结束后, 地下水水位抬升速率虽未变化, 但降雨后 1 d 地下水水位并未因作物耗水而有所下降, 降雨后 2 d 地下水水位才开始下降。期间第三场降雨由于雨量太小, 并未对地下水的水位抬升即时起作用。直到第四场和第五场降雨的发生, 地下水水位立即抬升。由此可见, 交替进行的低强度的降雨对地下水水位的补给起到促进作用。但地下水水位的抬升速率不因雨强大小而有所改变。这与上部分利用日尺度的分析结果一致。将上述过程用日尺度的形式绘于图 9。可见, 利用日尺度分析仍然可以得出高强度降雨对地下水水位升高起促进作用结论, 但对地下水水位的响应时间则不一致: 对于第一场和第四场降雨, 以小时尺度分析结果表明降雨期间地下水水位已经响应, 而以日尺度分析结果表明中雨后 1 d 地下水水位才开始响应。这与观测时间及雨前地下水水位状态有关。

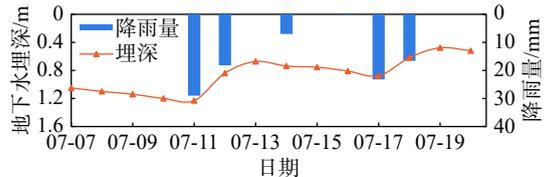


图 9 以日为尺度降雨对地下水埋深的影响

Fig. 9 Influence of daily scale rainfall on groundwater depth

3.2 涝情分析

在区分有雨日和无雨日时, 本文以逐日降水量 0.1 mm 作为划分阈值^[19]。大于 0.1 mm 则为有雨日, 小

于 0.1 mm 则反之。只有当日降水量达到一定程度才有可能对作物造成涝渍灾害。基于淮北平原本身的气候和土壤特点, 以及多年的观测资料, 对逐日降雨数据采用期望值公式进行排频分析(如式(4)), 选出日降水量不小于 10%(对应日降雨量 26.8 mm)的降雨序列, 在对降水序列的处理基础上进行涝渍分析。

$$P_m = \frac{m}{n+1} \tag{4}$$

式中: P_m 为降水量的经验频率; m 为降水量由大到小排位的项数; n 为数据序列长度。

根据气象站多年降水资料, 利用正距平法和 Z 指数法进行分析(表 2)。距平法分析结果显示, 各月的大涝次数在 1~3 之间变化, 一般涝的次数在 1~8 次范围内变化。各月的总受涝频次差异不大, 其变异系数为 0.27。在现涝频次的月分布中, 大涝次数最多的是 6、7 月份, 一般涝次数最多的是 8 月份。Z 指数法分析结果可见, 每个月极涝的次数在 2~4 次范围内, 每个月出现偏涝等级以上的频率多年平均值为 15%~22%, 而 Z 指数法的偏涝等级以上的变异系数为 0.22。在出现涝的情况下, 极涝和大涝出现的概率会更大一些。在现涝频次的月分布中, 极涝、大涝和偏涝出现次数最多分别是 6 和 7 月份、5 月份及 8 月份。表 2 显示, 仅从受涝的频率看, Z 指数法的结果要高于距平法, 只有 6—8 月除外; 正距平指标的结果在正常以上的概率在 50% 以下。五道沟地区一年中 5—9 月份受涝的概率更大, 因为这段时间淮河平原处于梅雨期和台风期, 降水概率大。

表 2 距平法和 Z 指数法涝情分析结果

Tab. 2 Analysis results of waterlogging situation by anomaly method and by Z index method

时间	距平法					Z指数法					
	现涝频次/次			经验频率/%		现涝频次/次				经验频率/%	
	大涝	一般涝	正常	一般涝以上	正常	极涝	大涝	偏涝	正常	偏涝以上	正常
1月	0	3	1	9.38	3.13	0	1	1	30	6.25	93.75
2月	0	1	1	3.12	3.13	2	0	0	30	6.25	93.75
3月	1	1	5	6.25	15.63	2	0	0	30	6.25	93.75
4月	1	0	5	3.12	15.63	1	0	0	31	3.12	96.88
5月	1	4	7	15.62	21.88	2	4	1	25	21.88	78.12
6月	3	3	8	18.75	25.00	3	3	1	20	21.88	62.50
7月	3	3	6	18.75	18.75	3	2	0	20	15.62	62.50
8月	1	5	9	18.75	28.13	1	5	0	17	18.75	53.12
9月	2	3	5	15.62	15.63	2	3	2	25	21.88	78.12
10月	1	2	5	9.38	15.63	2	3	0	27	15.62	84.38
11月	0	1	3	3.12	9.38	1	3	0	28	12.50	87.50
12月	0	0	1	0	3.13	1	0	0	31	3.12	96.88
年						3	3	0	17	18.75	53.12

将多年的年内土壤水分分别与地下水埋深、降水-蒸发的年内分布绘制于图 10 和 11。0~1 m 范围内, 土壤水含水率分布范围为 [0.21,0.40], 土壤水分剖面由表层到深层先增加后减少, 各层土壤水分每年的最低值都出现在 5、6 月份。降水与蒸发的差值范围为 [-32.5,101.5](单位: mm), 其值年内分配过程呈现单峰形式, 最大值出现在 7 月份, 增长幅度最大出现在 6—7 月这个阶段。由图 11 也可以看出, 土壤水分和地下水埋深在 7 月份的增加幅度也是最大的。小麦生长季(11—5 月)内土壤水和地下水变化趋势一致, 而玉米生长季(6—10 月)后期土壤水呈小幅度上升、地下水呈大幅度下降趋势。约在 9 月份, 雨量与蒸发量相抵消, 土壤含水率的增加可能由于地下水对其补给引起。因此在 7 月份不同雨强对地下水埋

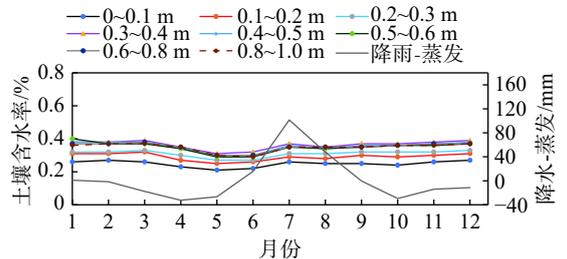


图 10 土壤水分和降水与蒸发差值年内变化

Fig. 10 Annual variation of soil moisture and precipitation minus evaporation

深的影响中,短历时的小雨或者中雨基本不改变地下水水位原有的趋势。而小雨与中雨交替、大雨或者暴雨强度对地下水水位的升高起促进作用,但地下水水位对降雨的响应存在滞后。

将 3.1 节内容中选取的 2018 年不同雨强的降雨及 2020 年 7 月份的日尺度降雨,用两种涝渍评价方法进行受涝等级评价与实际的地下水埋深变化进行对比,结果见表 3。

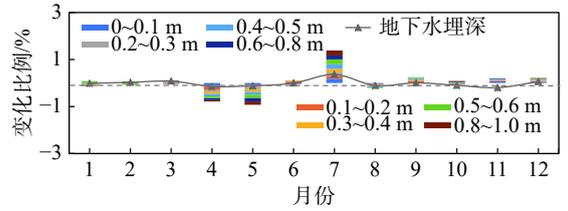


图 11 土壤水分及地下水埋深各月变化比例

Fig. 11 Ratio of monthly changes of soil moisture and groundwater depth

表 3 典型日尺度降雨受涝等级评价及实际地下水埋深变化

Tab. 3 Evaluation of waterlogging grade of typical daily scale rainfall and change of actual groundwater depth

降雨时段	正距平法	Z指数法	实际埋深
2018-03-01—2018-04-04	正常	正常	依旧下降
2018-07-09—2018-07-29	正常	正常	依旧下降
2018-01-01—2018-01-16	涝	极涝	前期缓慢上升,后期陡然升高
2018-01-17—2018-01-21	涝	极涝	维持稳定
2018-08-04—2018-08-30	大涝	极涝	震荡上升,上升速率快
2020-07-07—2020-07-15	涝	极涝	上升,降雨结束下降
2020-07-15—2020-07-20	涝	大涝	上升

两种方法评价出现涝情时,对应的实际地下水埋深是上升。虽然两种方法仅考虑降雨这一气象因素,没有考虑前期土壤含水量,但是仅考虑日降雨量在 26.8 mm 以上的降水事件,基本能判断实际受涝情况。比如在 2018-01-01—2018-01-21 阶段中,小雨和中雨的结合情况,虽然前期地下水埋深在 1.5 m 以下,但是两场降雨之后,地下水埋深上升 0.8 m 以内,而 1 月份是冬小麦拔节孕穗的关键时期,其耐渍深度在 1.0 m 左右。Z 指数法在评价暴雨后涝渍等级和中雨后的是一致的,都是最高级的极涝。这几场降雨都是长期无雨时的降雨,说明 Z 指数法容易加重长期无雨状态下降雨的涝渍灾害等级。综上,两种方法可以作为评价淮北浅埋区的作物受涝情况,若是长期无降雨后的降雨,其致涝等级会被高估。

4 结 语

利用五道沟实验站(1986—2018 年)长系列观测降水、地下水埋深资料,分析其降水及地下水埋深特征,并研究雨强对地下水埋深的影响,最后利用距平法和 Z 指数法对各月的涝情进行分析,得出以下主要结论:

(1) 淮北平原区的年降水在 1986—2018 年呈现上升趋势。年内降水量主要集中在 5—9 月,这 5 个月降雨频繁且降雨量大,降水次数约占全年总次数的 71.4%。

(2) 作物生长前期需水少,降水补给量决定了地下水水位的增长幅度,后期尽管会有降水补给,但需水量过大,地下水水位持续下降。

(3) 在地下水浅埋区,地下水埋深对一定范围内的降雨具有弹性。在 [600, 1 200](单位: mm)范围内的降雨,地下水水位会响应迅速。对于超出范围的降雨,地下水水位则恢复较慢。

(4) 在前期地下水水位下降的情况下,短历时的小雨或者中雨基本不改变地下水水位原有的趋势。而当小雨或者中雨交替进行,可能会致使地下水水位的升高,但升高时间存在滞后。大雨或者暴雨强度对地下水水位的升高起促进作用,但地下水水位对降雨的响应同样存在滞后。对比不同雨强下地下水水位的响应时间发现,随着雨强的增大,地下水水位的响应时间逐渐减小。

(5) 两种评价方法能较好反映淮北浅埋区的涝渍灾害情况,可用来作为作物排涝标准的依据之一。但

是长期无降雨(或作物需水量大)、地下水位低时,两种方法会高估受涝渍灾害程度,且Z指数法比正距平法高估的情况更明显。

参 考 文 献:

- [1] GUAN X X, ZHANG J Y, YANG Q L, et al. Evaluation of precipitation products by using multiple hydrological models over the upper Yellow River Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4023.
- [2] 姚瑶,唐婉莹,袁宏伟,等.基于称重式蒸渗仪的淮北平原冬小麦蒸散估算模型的本地化[J].*麦类作物学报*, 2020, 40(6): 737-745. (YAO Yao, TANG Wanying, YUAN Hongwei, et al. Calibration of evapotranspiration for winter wheat based on the value of weighing lysimeter measurements in Huaibei plain[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(6): 737-745. (in Chinese))
- [3] 陈柏丽,朱永华,王春艳,等.淮北平原降水量和参考作物蒸散量时空演变规律研究[J].*灌溉排水学报*, 2018, 37(6): 109-116. (CHEN Baili, ZHU Yonghua, WANG Chunyan, et al. Spatiotemporal variation of precipitation and evapotranspiration in Huaibei plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(6): 109-116. (in Chinese))
- [4] 朱建强.基于作物的农田排水指标及排水调控研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2006. (ZHU Jianqiang. Study on farmland drainage indices and drainage control based upon crop[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006. (in Chinese))
- [5] 鞠笑生,邹旭恺,张强.气候旱涝指标方法及其分析[J].*自然灾害学报*, 1998, 7(3): 51-57. (JU Xiaosheng, ZOU Xukai, ZHANG Qiang. The operational system of drought flood climate monitoring and early warning and its services[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1998, 7(3): 51-57. (in Chinese))
- [6] 李红军,江志红,魏文寿.近40年来塔里木河流域旱涝的气候变化[J].*地理科学*, 2007, 27(6): 801-807. (LI Hongjun, JIANG Zhihong, WEI Wenshou. Drought and flood change of Tarim River basin in recent 40 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(6): 801-807. (in Chinese))
- [7] 张瑞涵,高涵.气候变化条件下黄河流域的旱涝特征[J].*西安理工大学学报*, 2020, 36(3): 323-329. (ZHANG Ruihan, GAO Han. Characteristics of drought-flood in the Yellow River Basin under climate change[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2020, 36(3): 323-329. (in Chinese))
- [8] SHAO W Y, KAM J. Retrospective and prospective evaluations of drought and flood[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 141155.
- [9] TAHROUDI M N, RAMEZANI Y, DE MICHELE C, et al. A new method for joint frequency analysis of modified precipitation anomaly percentage and streamflow drought index based on the conditional density of copula functions[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(13): 4217-4231.
- [10] 葛岩,李趋,褚丽妹,等.基于修正Z指数辽西北地区干旱时空特性分析[J].*灌溉排水学报*, 2013, 32(5): 133-136. (GE Yan, LI Qu, CHU Limei, et al. Temporal and spatial analysis on drought events in northwest of Liaoning based on adjusted Z-index[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(5): 133-136. (in Chinese))
- [11] 贺音,王钊,贺皓.三种不同干旱动态监测指数在陕西省的适用性研究[J].*干旱地区农业研究*, 2014, 32(4): 242-249, 274. (HE Yin, WANG Zhao, HE Hao. Application of three dynamic drought-monitoring indexes in Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 242-249, 274. (in Chinese))
- [12] 祁靓雯,钱会,高盼盼.可利用降雨量Z指数法的西安市气象干旱特征[J].*南水北调与水利科技*, 2016, 14(2): 93-98, 124. (QI Jingwen, QIAN Hui, GAO Panpan. Drought characteristics of Xi'an city based on Z index of available rainfall[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(2): 93-98, 124. (in Chinese))
- [13] 王怡宁,杨秒,王兵,等.五道沟地区“蒸发悖论”及成因探析[J].*灌溉排水学报*, 2020, 39(3): 126-133. (WANG Yining, YANG Miao, WANG Bing, et al. The “evaporation paradox” in Wudaogou area and its underlying mechanisms[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 126-133. (in Chinese))
- [14] 王振龙,陈玺,郝振纯,等.淮北平原水文气象要素长期变化趋势和突变特征分析[J].*灌溉排水学报*, 2010, 29(5): 52-56. (WANG Zhenlong, CHEN Xi, HAO Zhenchun, et al. Long-term trend and jump change for major climate processes over the

- area of Huaibei[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(5): 52-56. (in Chinese))
- [15] 王振龙, 孙乐强, 郝振纯, 等. 淮北平原降水时空变化规律研究[J]. *水文*, 2010, 30(6): 78-84, 92. (WANG Zhenlong, SUN Leqiang, HAO Zhenchun, et al. Research on temporal and spatial variation of precipitation in Huaibei plain[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(6): 78-84, 92. (in Chinese))
- [16] 王宏, 余锦华, 李宗涛, 等. 基于Z指数的河北省旱涝多尺度变化特征[J]. *气象与环境学报*, 2012, 28(1): 43-47. (WANG Hong, YU Jinhua, LI Zongtao, et al. Multi-time scale characteristics of drought and flood based on Z index in Hebei Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2012, 28(1): 43-47. (in Chinese))
- [17] 鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(1): 26-33. (JU Xiaosheng, YANG Xianwei, CHEN Lijuan, et al. Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8(1): 26-33. (in Chinese))
- [18] 李玲芝. 易涝易渍农田水文过程及其对作物的影响研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012. (LI Lingzhi. Hydrological process and its impact upon crops in farmland vulnerable to waterlogging[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012. (in Chinese))
- [19] 李明刚, 管兆勇, 梅士龙. 夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和Rossby波活动的联系[J]. *大气科学*, 2016, 40(6): 1199-1214. (LI Minggang, GUAN Zhaoyong, MEI Shilong. Interannual and interdecadal variations of summer rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River in association with anomalous circulation and Rossby wave activities[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40(6): 1199-1214. (in Chinese))

Evaluation of waterlogging in Huaibei plain based on precipitation analysis

HUANG Aiming^{1,2}, GU Nan^{1,2,3}, HU Yongsheng⁴, YAN Haofang^{2,3,5}, DU Mingcheng^{2,3}, WANG Guoqing^{2,3}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Wudaogou Hydrology and Water Resources Experimental Station, Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu 233000, China; 5. Research Centre of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Waterlogging in the Huaibei plain has been a serious natural disaster which attracts tremendous attentions from government and local communities due to its huge influence on society and economy. It is of significance to study the response law of groundwater depth to precipitation change and the method of waterlogging evaluation for supporting the planning of regional drainage disaster reduction and crop harvest. Based on daily data of precipitation, groundwater depth and soil moisture measured at the Wudaogou Experimental Station with a time span of 32 years, the variation characteristics of precipitation and groundwater depth were analyzed by using statistical methods. Meanwhile, the effects of crops and different rainfall intensity on groundwater depth were investigated. Further more, waterlogging situation was evaluated by using the positive anomaly method and Z index method. The results show that annual precipitation in the shallow groundwater area in Huaibei plain mainly concentrates in the period from May to September. Precipitation dominates the increase range of groundwater level in the early stage of crop growth due to less water demand. However, groundwater level would continually decline in the crop growing stage due to dramatic increase in water demand. The groundwater depth presents a bimodal variation over a year. In the shallow groundwater area, the groundwater depth is elastic to the precipitation within a certain range. By comparing the response time of groundwater level under different rainfall intensities, it is found that the response time of groundwater level gradually decreases with the increase of rainfall intensity. Both the positive anomaly method and the Z index method are effective in evaluating the waterlogging situation in the shallow groundwater area of Huaibei. However, the Z index method might overestimate the severity of waterlogging disaster for a long-lasting drought and low groundwater level before rainfall occurs.

Key words: Huaibei Plain; precipitation; characteristics of groundwater depth; waterlogging analysis; crops