

宝山农场地下水动态分析

贾艳辉¹, 武玉刚², 朱文江², 马春芽¹, 李金山^{1*}, 殷欢庆³

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所 节水农业重点实验室, 河南 新乡 453002;

2. 黑龙江省宝山农场, 黑龙江 佳木斯 154000; 3. 河南省人民胜利渠管理局 获嘉管理处, 河南 获嘉 453800)

摘要:【目的】探求宝山农场地下水动态规律,为宝山农场引江灌溉水资源平衡利用提供理论依据。【方法】调查宝山农场11 a地下水水位资料,分析了宝山农场地下水位年内变化规律,利用双向回归结合降水指数(SPI)分析了地下水水位年际变化规律,并通过R/S分析法分析了地下水水位变化趋势。【结果】水稻生育期内抽取地下水灌溉,致使地下水水位下降0~2 m,在非生育期内可以恢复正常水平,宝山农场特征时间点的地下水水位在年际间变化有明显的突变趋势;地下水水位与SPI具有较强的线性相关关系, $R=0.8249$;R/S分析结果表明,提水灌溉不会导致地下水水位持续下降。【结论】降水和灌溉是影响宝山农场地下水位动态变化的主要因子;宝山农场目前的地下水水资源采补相对平衡;引江灌溉过程中要密切观测地下水水位变化。

关键词:宝山农场;地下水;动态分析

中图分类号:P641

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180016

贾艳辉,武玉刚,朱文江,等.宝山农场地下水位动态分析[J].灌溉排水学报,2018,37(9):73-78.

0 引言

浅层地下水是可利用水资源的重要组成部分,既是区域水循环系统的重要环节,又是农业灌溉及工业用水的重要来源之一。浅层地下水因其埋深较浅,其水位和水质受气候条件、植被、地形及人类活动影响较大,浅层地下水水位动态变化规律及影响因素已成为国内外专家学者研究的热点问题^[1]。已有研究成果大多集中于地下水动态变化及影响因素和地下水动态序列分析预测等方面,而有关地下水动态趋势突变及其影响因素等方面研究还相对较少^[2]。地下水动态趋势研究采用的方法主要包括Mann-Kendall检验、滑动 t 检验、Yamamoto检验、双向回归分析方法、R/S分析法^[3-9],这些方法对趋势的检验有着很好的效果,其中双向回归分析法在解决趋势突变方面比较理想。

宝山农场地处三江平原,从1970年建场开始使用地下水灌溉,1992年开始从旱田改为水田,20多年来地下水水位有过一些波动,随着宝山农场引江水灌溉工程的推进,地下水将形成新的平衡。运用双向突变分析,R/S分析方法并结合区内标准化降雨指数(SPI)对地下水动态趋势突变进行分析,探明宝山地区浅层地下水动态趋势突变对地下水动态变化的影响,分析趋势突变与降水之间的响应关系,研究结果对于该地区地下水的合理开发和利用具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宝山农场始建于1970年,隶属黑龙江生产建设兵团第三师第二十六团。农场位于黑龙江省三江平原西区中部(46°55'—47°01'N,130°47'—130°57'E),属松花江流域,总面积100 km²,有耕地面积6 667 hm²,土壤为草甸土类,黑土层30~50 cm,有机质5.16%。土壤肥沃,是垦区重要商品粮基地之一。

收稿日期:2018-01-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403204);中国农业科学院创新工程协同创新行动项目(CAAS-XTX2016008)

作者简介:贾艳辉(1982-),男,博士,主要从事灌区水资源研究。E-mail: jyh_5151@126.com

通信作者:李金山(1972-),男,研究员,主要从事节水灌溉研究。E-mail: lijinsan72@126.com

农场处于半湿润气候区,属季风性温带大陆气候,冬季漫长、寒冷干燥,夏季短促、温暖湿润,降雨量316.7~841.1 mm,6—10月降水量占全年的60%~80%,地势南高北低,坡降为1/5 000,平均海拔72 m,地势平坦,地下水资源丰富,适宜各种农作物生长。

1.2 数据来源

收集了宝山农场1个长系列监测井(地面高程73.259 m)11a(1997—2007年)的逐旬地下水位监测资料、2007年4月14日的宝山农场地下水位调查资料(图1)及佳木斯气象站11 a(1997—2007年)的逐日降水资料。

1.3 数据分析

对1997—2007年的年内地下水位数据进行分析,找出地下水位年内变化特征时间,对每个特征时间再进行突变分析,找出地下水位突变的影响因素,最后用R/S法分析地下水位总体趋势。

1.3.1 双向回归分析

采用双向回归分析方法^[10]对11 a的地下水位观测数据中的特征点进行趋势突变分析,找出趋势突变时间。假设时间序列在第C点发生了趋势突变,时间序列 $t_i(i=1, 2, 3, \dots, n)$,可用双向回归模型表示以点C为界的前、后二段趋势不同的直线:

$$t_i = \begin{cases} a_0 + b_0 i + e_i, & i = 1, 2, \dots, r \\ a_1 + b_1 i + e'_i, & i = r + 1, r + 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为时间序列总长; e_i, e'_i 为误差; a_0, a_1 分别为前、后段拟合直线的截距; b_0, b_1 分别为前、后段拟合直线的斜率。 $r, r+1$ 为突变点前后整数, $r \leq C < r+1$ 。拟合C及其他参数值,拟合公式为:

$$t_i = a_0 + b_0 i + b(i - C)INDC(i) + e_i \quad (2)$$

式中: $b = b_1 - b_0$; $INDC(i) = \begin{cases} 0, & i \leq C \\ 1, & i > C \end{cases}$ 。用最小二乘法求出各回归系数,并求出方程残差平方和 $S_i(i=1, 2, \dots)$,然后对突变趋势进行显著性检验,统计量为 U ,其计算式为:

$$U = \frac{(S_0 - S)/3}{S/(n-4)} \quad (3)$$

式中: S_0 为式(2)无突变直线回归方程的残差平方和; S 为式(2)对应最优突变点的残差平方和。在显著性水平0.05下接受突变点,否则认为突变不明显。式(3)遵从 $F(3, n-4)$ 分布。

1.3.2 标准化降水指数

标准化降水指数(SPI)^[11]是表征某时段降水量出现概率的指标,用于月尺度以上的气象干旱监测与评估^[12],通过计算给定时间尺度内降雨量的累积概率,使之能够在多个时间尺度上进行计算比较。由于12个月时间尺度的SPI能比较清楚地反映旱涝阶段性变化^[13],计算逐月降水序列12个月时间尺度的SPI,用来分析降水对地下水趋势突变的影响。SPI的计算参照文献[14]。

1.3.3 R/S分析法

R/S分析法是英国水文学家Hurst提出的一种统计量用以处理时间序列的方法。R/S分析法能将一个随机序列与一个非随机序列区分开来,而且通过R/S分析还能进行非线性系统长期记忆过程的探寻。同时对时间序列具有预测的功能,在分形理论中有着重要的作用。Hurst指数(H)可衡量一个时间序列的统计相关性。当 $H=0.5$ 时,时间序列就是标准的随机过程。当 $0.5 \leq H < 1$ 时,存在状态持续性,时间序列是一个持久性的或趋势增强的序列。当 $0 < H \leq 0.5$ 时,时间序列是反持久性的或逆状态持续性的,这时候,若序列在前一个期间向上走,那么下一期多半向下走。通常采用R/S分析法计算分形中的赫斯特(Hurst)指数,便进一步识别时间序列的动态变化趋势,采用R/S法分析地下水动态过程的发展趋势^[15]。

对于一个时间序列 $\{x_i\}$,分为 N 个长度为 A 的等长子区间,对于每一个子区间,设:

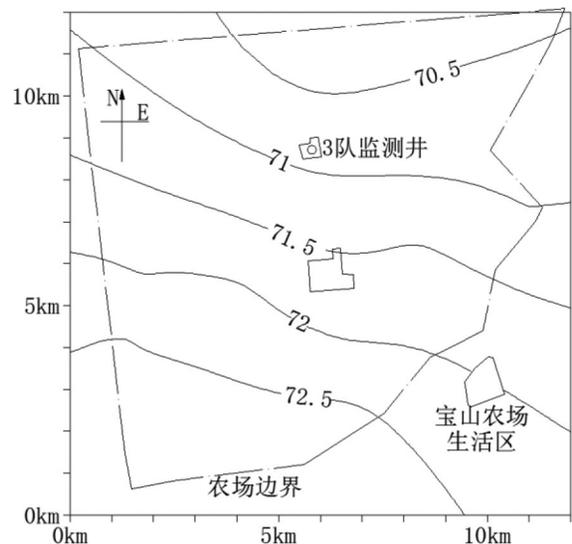


图1 地下水位等值线图(2007年4月14日,单位:m)

$$X_{t,N} = \sum_{u=1}^A (x_u - M_N), \quad (4)$$

式中： M_N 为第 N 个区间 x_u 的平均值； $X_{t,N}$ 为第 N 个区间的累计离差。令：

$$R = \max(X_{t,N}) - \min(X_{t,N}), \quad (5)$$

若以 S 表示 x_u 序列的标准差，则可定义重标极差 R/S ， R/S 随时间而增加。Hurst通过长时间的总结，建立了关系式，即：

$$R/S = K(n)^H, \quad (6)$$

对式(6)取对数，得到：

$$\log(R/S)_n = H \log(n) + \log(K). \quad (7)$$

对 $\log(n)$ 和 $\log(R/S)_n$ 进行最小二乘回归即可估算。

2 结果与分析

2.1 年内地下水位趋势分析

宝山农场地下水位监测数据(1997—2007年)如图2所示，宝山农场降水数据如图3所示。从图2可以看出，宝山农场不同年份地下水位年内变化过程不完全相同，除了1997、1998和2004年，其余年份的地下水位变化过程大致相同，均在非生育期保持较高水平，在生育期内处于较低水平(下降约1.5~2.0 m)，4月下旬灌水后水位下降，8月下旬至9月上旬停灌，地下水位开始恢复，到10月前后开始趋于平稳。这是由于生育期内开采浅层地下水灌溉引起的，而1997、1998和2004年因为生育期内降水较多(图3)，生育期内没有进行灌溉，所以地下水位一直处于较高水平；特别是1997年，全年共降水621.5 mm，生育期内降水580 mm，在满足作物正常生长对水分需求的同时，还补给了地下水，使地下水位抬升。从图2可以看到，5月15—24日连续降水79 mm，地下水位抬高了近1 m。

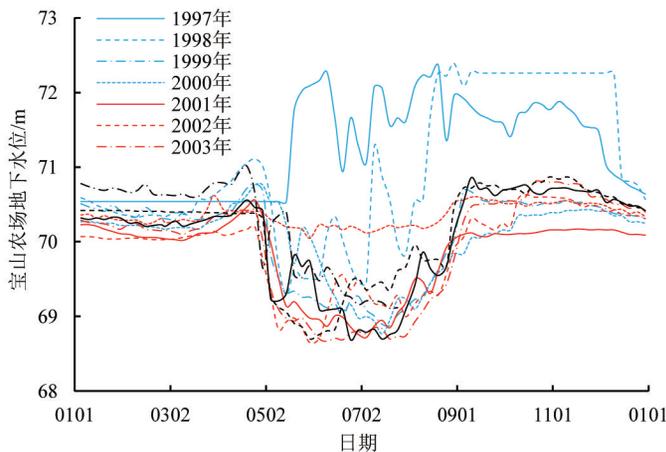


图2 宝山农场年内地下水位变化过程

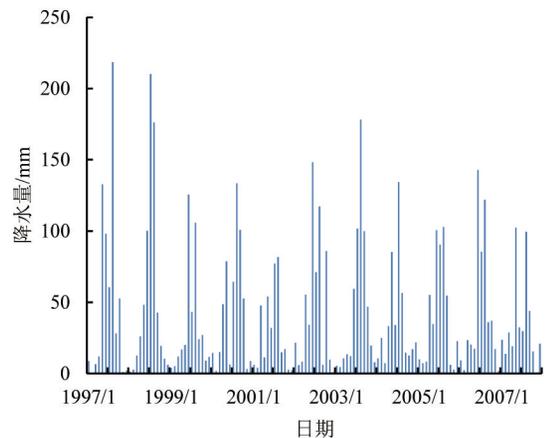


图3 宝山农场月降水量(1997—2007年)

2.2 多年地下水位突变分析

为描述分析方便又不失总体趋势，选择2月15日、4月25日、5月15日、7月15日、9月15日和12月15日的地下水位观测值作为地下水位动态变化进程的特征点。研究区域1997—2007年11个自然年年内的6个地下水位如表1所示。

表1 各特征时间地下水位

特征时间	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年
2月15日	70.35	70.35	70.46	70.20	70.06	70.04	70.17	70.24	70.21	70.34	70.77
4月25日	71.92	71.11	70.78	70.76	70.56	70.20	70.42	70.41	70.46	70.11	70.64
5月15日	71.96	69.29	69.32	70.22	69.14	68.93	68.98	70.20	69.31	69.06	70.40
7月15日	72.06	70.88	68.90	68.77	68.95	69.16	68.84	70.18	68.70	69.46	69.19
9月15日	71.71	72.26	70.58	70.05	70.08	70.26	70.50	70.60	70.71	70.79	—
12月15日	70.83	70.86	70.38	70.35	70.13	70.37	70.50	70.43	70.53	70.51	—

表2 各特征点突变时间及检验结果

特征点	特征时间	统计量 U	突变时间 C	F 检验结果
1	2月15日	5.71	2002.5	显著
2	4月25日	4.90	2001.5	显著
3	5月15日	1.36	2001.4	不显著
4	7月15日	10.22	1999.1	显著
5	9月15日	6.14	2000.2	显著
6	12月15日	7.08	2000.5	显著

从表1可以看出,研究区域监测井地下水位各特征点多年动态变化存在2个不同的趋势阶段,在2001年前后存在突变点,各特征时间点的地下水位存在突变点前是下降趋势,在突变点后是上升趋势。利用双向回归分析方法对监测井各个特征时间的时序序列进行趋势突变分析,根据式(2)拟合各参数,通过式(3)计算统计量 U 。各特征时间点的突变趋势通过0.05显著性水平检验($F_{0.05}(3,7)=4.35, F_{0.05}(3,6)=4.76$)。由表2可知,宝山农场1997—2007年地下水位各特征点的突变时间大多分布在2000—2001年前后,总体呈现先下降后上升趋势,大部分特征时间点(2月15日、4月25日、9月15日和12月15日)的地下水位有明显的突变趋势,特征时间点5月15日的突变趋势并不明显,统计量 U 也很小,图中7月15日的统计量 U 虽然很大,但突变点前后的变化并不平稳,随机性很大。这是由于5月15日和7月15日处于水稻灌溉季,地下水提水及降雨随机性很大,从而导致浅层地下水位随机性较大。

2.3 地下水位的SPI影响分析

宝山农场从1992年改水田,水稻灌溉主要使用地下水,因此灌溉提水成为影响浅层地下水位年内动态的主要因素之一。研究区域内降水除直接通过入渗补给地下水外,还会间接地影响当年水稻的灌溉用水量从而影响地下水的开采量。佳木斯气象站1997—2007年SPI曲线如图4所示。1997年和1998年的SPI较高,随后1999—2001年呈现下降趋势,2002—2007年SPI变化较平稳。这与地下水位的突变时间及变化趋势都比较吻合。

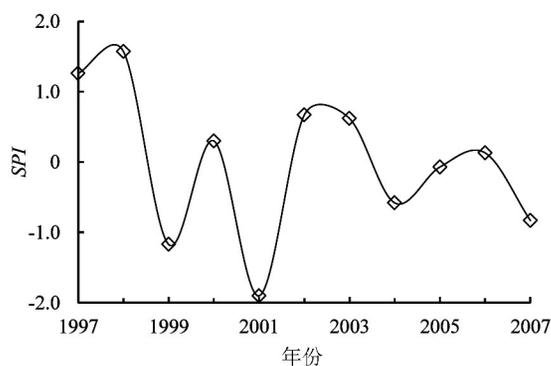


图4 佳木斯气象站12个月尺度SPI曲线

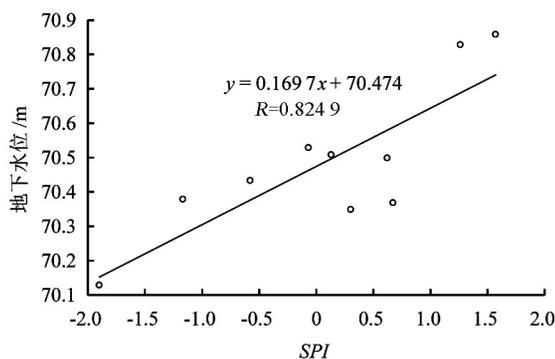


图5 地下水位与月尺度SPI之间的变化曲线

对比地下水位年际变化(12月15日)和SPI曲线可知,当SPI较高时,年内降雨入渗较多,同时灌溉提水量也随之减少,该年末的地下水位就会升高,如1997年及1998年;而当SPI较低时,年内降雨入渗较少,同时灌溉提水量也随之增加,该年末的地下水位就会降低,如2001年。为了更直观地展现各监测井地下水位年际变化趋势与降水的响应关系,绘制1997—2006年的特征时间12月15日地下水位与12个月尺度SPI之间的变化曲线如图5所示。从图5可以看出,地下水位与SPI呈线性相关关系, $R=0.8249$,说明降雨是影响地下水年际水位变化的主要因素。

2.4 地下水位趋势R/S分析

对数据进行计算分析,得到了R/S序列如图6所示,经最小二乘法回归,可得 $H=0.605$ 。这说明序列未来

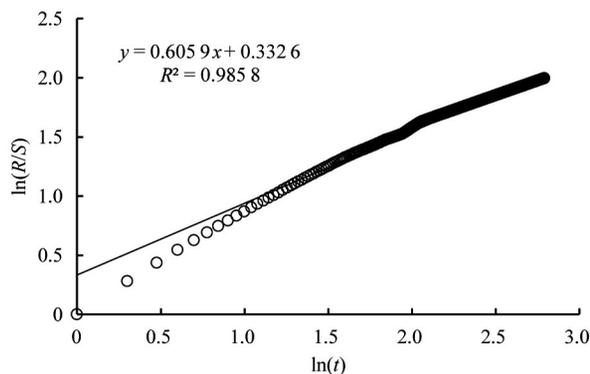


图6 $\ln(R/S) \sim \ln(t)$ 曲线

变化过程与过去一致,地下水位趋势将与以往保持一致。这一点可以用2017年4月的地下水位调查数据进行验证(图1)。即经过1992年到2007年再到2017年的水田提水灌溉,地下水位并未发生持续下降,说明使用地下水灌溉水稻不会发生大面积地下超采水漏斗。

3 讨论

宝山农场黏土层分布不厚,地下水接受降雨补给及灌溉水回补,宝山农场地处三江平原上游,南部距山不到20 km,有较好的地下水侧向补给条件,这是由于地下水位在非灌溉季年际变化较平稳的原因,而在灌溉季由于提水和降雨入渗的原因导致年际变化随机性较强,本研究得出,研究区域年内地下水的波动受灌溉和降雨补给影响较大,与的研究结论^[2,16-17]相类似。

从地下水位年际变化与SPI曲线对比及R/S分析可知,地下水位总体趋势比较平稳。经过1992年到2007年再到2017年这25 a的水田提水灌溉,地下水位并未发生持续下降,宝山农场地下水资源的采补是平衡的。这与文献[2]的结论不同,主要是因为文献[2]的研究区是三江平原腹地,耕地面积大,地下水侧向补给量相对不足。随着引江水灌溉工程的推进,宝山农场以及三江平原上游地区的水资源将会形成新的平衡,因此引江灌溉时应密切监测地下水位的动态,防止地下水位过高。

4 结论

1)从宝山农场1997—2007年地下水位年内变化可以看出,非灌溉季地下水位总体比较平稳,灌溉季地下水位下降2~3 m,水稻收获后地下水位能恢复到灌溉前的水平。

2)从各特征时间点地下水位年际变化看,地下水位在2001年左右有突变点,突变点前地下水位呈现下降趋势,突变点后地下水位呈现上升趋势。对比地下水位年际变化和SPI曲线可知,地下水位年际变化与SPI呈线性关系,而且相关性很高,说明地下水位年际变化主要受降雨入渗影响。

3)通过R/S分析可知,Hurst指数 $H=0.605$,说明地下水位将不会有较大的变化,宝山农场目前的地下水资源采补时平衡的。

参考文献:

- [1] SIEBERT S, BURKE J, FAURES J M, et al. Groundwater use for irrigation-a global inventory[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 7(3): 3 977-4 021.
- [2] 危润初,肖长来,方樟.黑龙江建三江地区地下水动态趋势突变点分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 202-210.
- [3] 吉磊,刘兵,何新林,等.玛纳斯河下游灌区地下水埋深变化特征及成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 59-65.
- [4] 王建莹,刘燕,姚阿漫. 泾惠渠灌区地下水动态分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 67-70
- [5] GHAZAVI R. Impacts of land-use change on groundwater resources using remote sensing and numerical modeling[J]. Journal of Biodiversity & Environmental Sciences, 2016, 9(4):149-157.
- [6] 朱建强,刘会宁,耿显波,等. 易涝易渍农田地下水动态特征[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 1-4.
- [7] 杨艳鲜,张丹,雷宝坤,等. 洱海近岸菜地浅层地下水动态变化特征及影响因素[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 1-9.
- [8] 汪生斌,肖勇,王万平,等. 青海省格尔木山前平原区地下水动态特征分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 241-247.
- [9] 夏晶,刘宁,高贺文,等. 商丘市浅层地下水位下降对区域气候的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4 408-4 415.
- [10] SOLOW A R. Testing for Climate Change: An Application of the Two-Phase Regression Model[J]. Journal of Applied Meteorology, 1987, 26(10): 1 401-1 405.
- [11] WU H, HAYES M J, WEISS A, et al. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China - Z Index and the statistical Z - Score[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(6):745-758.
- [12] 杨晓静,左德鹏,徐宗学. 基于标准化降水指数的云南省近55年旱涝演变特征[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 473-480.
- [13] PATEL N R, CHOPRA P, DADHWAL V K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index[J]. Meteorological Applications, 2010, 14(4): 329-336.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 气象干旱等级:GB/T20481—2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [15] HURST H E. Long term storage capacities of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116(12): 776-808.
- [16] 贺屹. 渠井双灌区地下水超采情况下的动态分析及人工补给研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [17] 孟凡傲,梁秀娟,郝洋,等. 洮儿河扇形地地下水动态特征分析[J]. 节水灌溉, 2016(4): 65-68, 74.

Dynamic of Groundwater Table in Baoshan Farm

JIA Yanhui¹, WU Yugang², ZHU Wenjiang², MA Chunya¹, LI Jinshan^{1*}, YIA Huanqing³

(1.Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2.Baoshan Farm, Jiamusi 154000, China; 3. Huojia Management Office of Henan People's Victory Canal Administration, Huojia 453800, China)

Abstract: 【Objective】 The change in groundwater table affects many ecohydrological processes and this paper analyzed the dynamics of the depth of groundwater table at Baoshan farm in Heilongjiang Province. 【Method】 The seasonal variability of groundwater table was analyzed based on the measured data from 1997 to 2007 at Baoshan farm. The annual variation of the groundwater table was analyzed by the two-way regression combined with the standardized precipitation index (*SPI*), and the possible trend in the change of groundwater table was analyzed using rescaled range analysis (*R/S*). 【Result】 Groundwater table dropped 0 to 2 m during the growing season of rice due to extraction for groundwater irrigation, and it then rebounded to normal level in the following fallow period before planting the rice again. A precipitation of 80 cm during the rice growth season could lead to the groundwater table rising by 1.0 m. Temporally, annual average groundwater table showed a steady rise or dropping. There was a strong linear relationship between the groundwater table and *SPI* with $R^2=0.680$. Using the groundwater for irrigation did not cause a continuous groundwater table dropping. 【Conclusion】 Precipitation and irrigation are the major factors influencing the dynamics of the groundwater table at Baoshan farm. Keeping extraction and recharge of the groundwater resources at a reasonable ratio at Baoshan farm is the key to prevent waterlogging and the secondary soil salinity.

Key words: Baoshan farm; groundwater; dynamic analysis

责任编辑:陆红飞

(上接第 47 页)

The Variation of Water Infiltration Rate over Various Slopes in Taihang Mountain

ZHANG Zhihua¹, SANG Yuqiang¹, KONG Yuhua¹, FENG Xuejin¹, JIA Changrong², SHI Yuefeng^{3*}

(1. Forestry College of Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China; 2.State-owned Nanshan Forest Farm in Jiyuan, Jiyuan 459000, China; 3. Water Resources Protection and Research Institute, YRBWRPB, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: 【Objective】 This study was to explore the variation of water infiltration over different slopes in Taihang Mountain. 【Method】 Representative slopes were selected in an abandoned land and two man-made forests with *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis* plantation respectively. Based on field investigation and lab analysis, infiltration experiments were conducted at different location of the slopes. The Horton model, the Philip model and the Kostikov model were used to simulate the infiltration processes. 【Result】 The initial infiltration rate, steady infiltration rate and average infiltration rate in the upper part of all slopes were the highest, followed by the middle and bottom parts. The steady infiltration rate in the upper slope with *Quercus variabilis* plantation increased 29.41% and 83.33%, compared to that in the middle and bottom parts of the slope respectively. For the slope with *Platycladus orientalis* plantation these increases were 90.43% and 67.29% respectively, while for the slope in the abandoned land they were 20.00% and 36.63% respectively. The determination coefficient of the Horton model, Philip model and Kostikov model was 0.90, 0.74 and 0.96, respectively. 【Conclusion】 Water infiltration over a slope varied considerably, with the rate on the upper part much higher than that on the middle and bottom. The Kostikov model and the Horton infiltration model appeared to be more suitable for describing the water infiltration processes in the areas we studied.

Key words: hilly area; slope position; infiltration properties; infiltration model

责任编辑:白芳芳