

洛惠渠灌区地下水电导率时间稳定性分析

徐国策^{1,2}, 刘海波³, 申震洲¹, 王金花¹, 冉大川¹, 李占斌², 李鹏²

(1. 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003; 2. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048; 3. 北京水保生态工程咨询有限公司, 北京 100055)

摘要: 土壤盐渍化是当前世界农业发展的重要制约因素, 研究地下水电导率的时空变化特征对灌区地下水农业灌溉具有重要指导意义。该研究基于 2004—2010 年对洛惠渠灌区 3 个阶地 51 个观测井地下水电导率的长序列监测结果, 利用相对差分法、Spearman 秩相关系数法和 Morlet 小波变换的方法分析了研究区地下水电导率的时间稳定性和周期性特征。结果表明: 3 个阶地在不同监测时间的电导率平均值均表现为阶地 3 (海拔>369~388 m) > 阶地 1 (海拔>342~360 m) > 阶地 2 (海拔>360~369 m), 且各阶地间地下水电导率的平均值均存在极显著差异 ($P<0.01$)。3 个阶地在不同时间的地下水电导率均属于中等变异, 变异系数的范围为 44%~75%。井点地下水电导率的时间稳定性强弱与其所在阶地关系不大, 不同阶地的地下水电导率均表现出强烈的时间稳定性。阶地 1、阶地 2 和阶地 3 的地下水电导率代表性位置点分别为 40#、38#和 45#井点; 而整个研究区的地下水电导率代表性位置点为 2#井点。基于对 36# (高电导率) 和 43# (低电导率) 井点地下水电导率和水位的小波分析表明研究区地下水电导率和水位存在周期性变化。结果表明, 洛惠渠灌区地下水电导率具有很强的时间稳定性和周期性, 可以利用地下水电导率代表性位置点来监测研究区地下水平均电导率的变化, 从而为灌区快速准确地确定灌溉时间以降低土壤盐渍化风险提供一定的参考。

关键词: 灌渠; 地下水; 电导率; 时间稳定性; Morlet 小波变换

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.10.016

中图分类号: S273.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-10-115-07

徐国策, 刘海波, 申震洲, 等. 洛惠渠灌区地下水电导率时间稳定性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 115—121.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.10.016 http://www.tcsae.org

Xu Guoce, Liu Haibo, Shen Zhenzhou, et al. Temporal stability of groundwater electrical conductivity in Luohuiqu irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 115—121.

(in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.10.016 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤盐渍化是由自然或人类活动引起的重要环境问题, 特别是在干旱和半干旱地区^[1]。灌溉农业目前大约占世界粮食和纤维生产的三分之一, 而且到 2040 年将占到接近 50%^[2]。在全球范围内, 每年大约有一千万公顷灌溉土地因为土壤盐渍化而荒弃^[3-5]。土壤盐渍化降低了土壤质量, 限制了作物生长, 降低了农业生产力, 并且在严重的情况下会导致农地弃耕^[6]。土壤盐渍化已经引起了全世界的极大关注, 其分布、成因、危害及其预防措施都得到了很好的研究^[7-10], 一些新技术也被成功地用来识别和监测受盐渍化威胁的地区^[11-12]。

时间稳定性的概念被定义为土壤性质的统计参数和空间位置之间不随时间变化的关联性^[13]。Vachaud 等最先提出了时间稳定性的概念, 假设特定位置可以在一段时间内代表一个试验区的平均值^[14]。其他研究人员随后的研究支持了这一假设^[15-20]。时间稳定性的概念可以极大

地降低表征野外土壤水分含量所需的样本数。鉴于土壤水分时间稳定性应用的巨大潜力, 这个概念受到了极大关注。一些学者也把时间稳定性的概念应用到了土壤性质的其他方面, 如 Castrignanò 研究了土壤电导率和钠含量的时间稳定性^[21]; Douaik 分析了土壤盐分空间格局的时间稳定性, 发现低盐点具有更好的时间稳定性, 高盐点具有最弱的时间稳定性^[13]。

洛惠渠灌区是关中平原重要的农业生产基地, 土壤盐渍化始终是当地农业生产发展的潜在威胁。由于人类活动的过度开发和利用, 当地的土壤盐渍化和灌溉引起的土壤次生盐渍化面积不断扩大, 威胁着可持续生产、耕地保护和粮食安全^[22]。灌溉水质是影响土壤盐度的重要因素。电导率是用来确定灌溉用水是否会引发土壤盐渍化的主要指标之一。电导率也反映了水体或土壤水溶液中的盐含量。相比盐度测定, 电导率测定更加可靠、经济和快捷。因此, 电导率是评价灌溉水质量的国际通行标准。但是, 目前为止, 地下水电导率时间稳定性的相关研究鲜见报道。因此, 评价地下水电导率的时间稳定性, 识别地下水电导率代表性位置点, 对灌区地下水电导率的监测和评价具有重要意义。

1 研究区概况

洛惠渠灌区 (109°43'~110°19'E, 34°36'~35°02'N)

收稿日期: 2015-01-14 修订日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401316); 陕西省自然科学基金研究计划项目 (2014JQ5175); 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金资助项目 (201502)。

作者简介: 徐国策, 男, 河南洛阳人, 博士, 讲师。主要从事水土流失和非点源污染模拟与调控等方面的研究。西安 西安理工大学, 710048。

Email: xuguoce_x@163.com

位于陕西关中平原东部的渭洛河阶地,属渭南市大荔县,面积约 750 km²,海拔高度为 329~533.5 m。灌区属温带大陆性半干旱气候区,年平均气温为 13.5℃,年平均降雨量为 480 mm,年平均蒸发量为 1 690 mm,年平均浅地下水埋深为 4~12 m。灌区地下水补给来源主要是降雨和引水灌溉,其次是塬区潜水和微承压水,地面 40~50 m 以下的古湖沉积物中富集了大量的可溶盐类,在水循环作用下,古湖沉积物中富集的可溶盐上升,致使潜水矿化度偏高,有些地区水味咸苦,不能引灌。受地形变化影响,整个灌区地下水流向与地面坡度基本一致,自西北向东南,出露于河谷,最终汇入盐湖或流入黄河滩。基于地质情况整个灌区可根据海拔分为 3 个阶地:第 1 阶地 >342~360 m;第 2 阶地 >360~369 m;第 3 阶地 >369~388 m。灌区不同阶地观测井的位置分布见图 1。目前,灌区种植的主要是小麦、玉米、棉花和果树等。

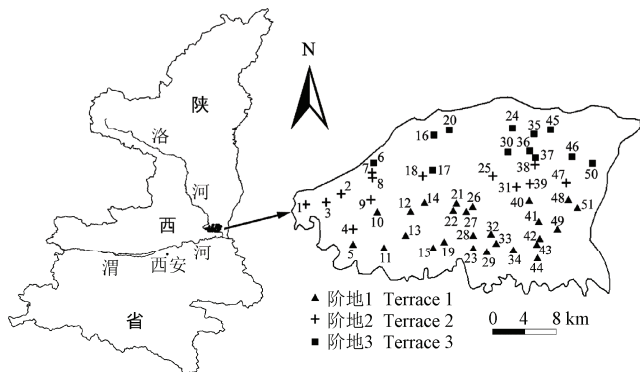


图 1 研究区位置及不同阶地观测井分布图

Fig.1 Location of study area and distribution of observation wells in different terraces

2 研究方法

2.1 采样方法

2004—2010 年对洛惠渠灌区 51 个观测井的地下水特征进行监测,3 个阶地的观测井个数分别为 26 (阶地 1)、13 (阶地 2) 和 12 (阶地 3)。水样取至水面下 2 m 处,测量其水温和电导率。采样的同时进行 GPS 定位,记录各个样点的信息。同时根据灌区各个观测井的水盐特征,将 36# (高电导率) 和 43# (低电导率) 井作为长期定位观测井,设置地下水位自动记录仪 CTD-Diver (美国) 进行地下水位、温度和电导率的自动观测。地下水位自动记录仪在 36# 和 43# 井的埋深分别为 13.5 和 38.2 m。

2.2 样品测定与分析方法

2 种方法被用来检验地下水电导率的时间稳定性:相对差分法和 Spearman 秩相关系数法^[14]。

对于相对差分法,相对差分 δ_{ij} 是基于测量点 $i(i=1, \dots, 51)$ 在时间 $j(j=1, \dots, 18)$ 的电导率值 (EC_{ij}) 与时间 j 的所有测量值的均值 (\overline{EC}_j) 的差:

$$\delta_{ij} = \frac{EC_{ij} - \overline{EC}_j}{\overline{EC}_j} \quad (1)$$

相对差分在时间上的均值 (mean relative difference, MRD) $\overline{\delta}_i$, 即平均相对差分和标准差 (standard deviation

of relative difference, SDRD) $\sigma(\overline{\delta}_i)$ 的计算公式分别为:

$$\overline{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\sigma(\overline{\delta}_i) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta_{ij} - \overline{\delta}_i)^2} \quad (3)$$

式中: m 为测定的次数。

所有样点按照 MRD 由小到大的顺序排列起来,并标注出每一个样点的 SDRD。小的 MRD 值表示位置点有时间稳定性,大的 MRD 值表示位置点存在强的时间变异性^[13]。根据 Vachaud 等如果一个样点的 MRD 接近于零并且 SDRD 也比较小,那么这个点就是代表性位置点。位置点 MRD 值在 ± 0.05 范围内可以被认为是接近于 0^[19,23]。样点的 MRD 值在 ± 0.05 之间变化是预测研究区地下水平均电导率状况的一个必要条件,时间稳定性位置点要满足的另一个条件是 SDRD 值较小^[19]。

第 2 种方法是基于非参数 Spearman 秩相关系数 r_s :

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_{ij} - R_{ik})^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

式中: R_{ij} 是在位置点 i 和时间 j 观测值的秩,而 R_{ik} 是观测值在同一个位置点 i 而不同时间 k 的秩, n 是观测点总数。

所有位置点在不同测量时间的这种相关性均被计算。 r_s 是一个介于 -1 和 +1 之间的变量, r_s 值越接近于 1 说明时间稳定性越好,越接近于 0 说明时间稳定性越差^[13]。

不同时间尺度下的地下水电导率和水位的周期性用 Morlet 小波变换分析。Morlet 小波函数的定义为^[24]:

$$g(t) = e^{s2\pi f_0 t} \cdot e^{-|t|^2/2} \quad (5)$$

式中: s 为虚数单位, f_0 为小波函数中心频率, t 为时间。

3 结果与分析

3.1 地下水电导率的时间变化特征

2004—2010 年 18 个时间点下不同阶地井点地下水电导率的统计特征见表 1。3 个阶地在不同时间点下的电导率平均值均表现为阶地 3 > 阶地 1 > 阶地 2, 且各阶地间地下水电导率的平均值均存在极显著差异 ($P < 0.01$)。这是因为阶地 3 地下水盐分大部分来自地质沉积物中可溶盐溶解,而阶地 1 除地质沉积物中可溶盐溶解外,还与大量抽取地下水及阶地 3 流入的盐分有关^[25-26]。变异系数 (coefficient of variation, CV) 可以用来定量确定空间变异的程度:弱变异 $CV \leq 10\%$, 中等变异 $10\% < CV < 100\%$, 强变异 $CV \geq 100\%$ ^[23]。因此,3 个阶地在不同时间的地下水电导率均属于中等变异 (44%~75%), 阶地 2 的变异程度小于阶地 1 和阶地 3 的变异程度。基于地表水和地下水管理对盐水电导率的分类:纯水 < 0.07 S/m、微含盐水 $\geq 0.07 \sim 0.2$ S/m、中含盐水 $\geq 0.2 \sim 1.0$ S/m、高含盐水 $\geq 1.0 \sim 2.0$ S/m、极高含盐水 $\geq 2.0 \sim 4.5$ S/m、卤水 > 4.5 S/m^[27]。根据每个井点在监测期间的地下水电导率平均值,研究区有 21 个井点属于微含盐水,30 个井点属于

中含盐水。研究区地下水电导率最小值和最大值的变化范围分别为 0.08~0.14 S/m 和 0.50~1.00 S/m。不同阶地地下水电导率最大值在不同月份的差异均较最小值大。

此外，阶地 1、阶地 2 和阶地 3 的地下水电导率最小值和最大值几乎总是分别出现在 34#、4#、46#和 26#、9#、36#井点。

表 1 不同时间下 3 个阶地的井点地下水电导率统计特征

Table 1 Summary statistics for groundwater electrical conductivity of well locations in 3 terraces at different time points.

日期 Date	阶地 1 Terrace 1				阶地 2 Terrace 2				阶地 3 Terrace 3			
	最小值 Min. /(S·m ⁻¹)	最大值 Max. /(S·m ⁻¹)	平均值 Mean /(S·m ⁻¹)	CV/%	最小值 Min. /(S·m ⁻¹)	最大值 Max. /(S·m ⁻¹)	平均值 Mean /(S·m ⁻¹)	CV/%	最小值 Min. /(S·m ⁻¹)	最大值 Max. /(S·m ⁻¹)	平均值 Mean /(S·m ⁻¹)	CV/%
2004-01	0.09(34#)	0.69(26#)	0.28	64	0.10(4#)	0.54(9#)	0.22	53	0.11(46#)	0.91(36#)	0.35	70
2004-03	0.10(34#)	0.78(26#)	0.30	65	0.11(4#)	0.58(9#)	0.25	54	0.11(46#)	0.92(36#)	0.32	70
2004-06	0.10(34#)	0.78(26#)	0.30	69	0.11(4#)	0.62(9#)	0.24	58	0.10(50#)	0.96(36#)	0.38	70
2004-08	0.10(34#)	0.84(26#)	0.29	75	0.11(4#)	0.61(9#)	0.24	57	0.11(46#)	0.99(36#)	0.40	67
2005-03	0.10(34#)	0.75(26#)	0.31	65	0.12(4#)	0.60(9#)	0.24	53	0.12(46#)	0.92(36#)	0.32	70
2005-05	0.10(34#)	0.76(26#)	0.31	66	0.12(47#)	0.61(9#)	0.27	50	0.12(46#)	0.91(36#)	0.38	64
2005-08	0.11(34#)	0.93(27#)	0.34	75	0.11(4#)	0.68(18#)	0.28	64	0.12(46#)	0.91(36#)	0.38	67
2005-09	0.10(34#)	0.79(19#)	0.32	71	0.11(4#)	0.59(9#)	0.26	53	0.12(46#)	0.94(36#)	0.38	69
2006-03	0.13(42#)	0.74(26#)	0.31	64	0.11(4#)	0.58(9#)	0.24	51	0.12(46#)	0.89(36#)	0.36	68
2006-08	0.11(34#)	0.85(26#)	0.33	67	0.11(4#)	0.58(9#)	0.26	50	0.11(46#)	0.90(36#)	0.36	68
2007-03	0.11(34#)	0.76(26#)	0.31	65	0.11(4#)	0.55(9#)	0.23	51	0.12(46#)	0.87(36#)	0.32	69
2008-03	0.11(34#)	0.78(26#)	0.31	64	0.11(4#)	0.55(9#)	0.24	49	0.13(46#)	0.87(36#)	0.36	62
2008-09	0.10(34#)	0.75(19#)	0.28	66	0.11(4#)	0.54(9#)	0.25	50	0.12(46#)	0.87(36#)	0.38	64
2009-03	0.11(34#)	0.77(19#)	0.30	65	0.11(4#)	0.52(9#)	0.23	47	0.12(46#)	0.82(36#)	0.38	59
2009-09	0.11(34#)	0.79(19#)	0.31	66	0.11(4#)	0.51(9#)	0.23	46	0.12(46#)	0.76(36#)	0.39	59
2009-12	0.11(34#)	0.79(26#)	0.31	66	0.11(4#)	0.51(9#)	0.23	47	0.12(46#)	0.79(36#)	0.38	60
2010-03	0.11(34#)	0.81(26#)	0.32	63	0.11(4#)	0.50(9#)	0.24	45	0.12(46#)	0.78(36#)	0.33	65
2010-09	0.08(42#)	1.00(19#)	0.37	72	0.13(4#)	0.53(9#)	0.26	44	0.14(46#)	0.91(36#)	0.41	59
平均值 Mean	0.10	0.80	0.31	67	0.11	0.57	0.25	51	0.12	0.88	0.37	66

注：CV 为变异系数。

Note: CV is coefficient of variation.

3.2 地下水电导率时间稳定性分析

Spearman 秩相关系数法是一个可以表达同一变量在不同时间变化强度和方向的非参数检验方法^[13]，主要反映测量样点空间模式在时间上的相似性^[19]。3 个阶地井点地下水电导率在 18 个时间点的 Spearman 秩相关系数 (r_s) 见表 2—表 4。由表可以看出，阶地 1、阶地 2 和阶地 3 的 r_s 变化范围分别为 0.71~0.99、0.74~1.00 和 0.70~

0.99，其值均在 $P<0.01$ 水平极显著相关且大部分 r_s 值均接近于 1，说明不同阶地的地下水电导率均表现出强烈的时间稳定性。方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 分析表明不同阶地的 Spearman 秩相关系数不存在显著差异，说明井点地下水电导率的时间稳定性强弱与其所在阶地关系不大。因此，Spearman 秩相关检验表明不同阶地井点的地下水电导率呈现出强烈的时空稳定性格局。

表 2 18 个时间点下阶地 1 的地下水电导率 Spearman 秩相关系数

Table 2 Spearman rank order correlation coefficients for groundwater electrical conductivity in terrace 1 at 18 time points

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
2	0.87																		
3	0.90	0.97																	
4	0.76	0.80	0.82																
5	0.92	0.95	0.98	0.83															
6	0.94	0.96	0.98	0.82	0.98														
7	0.93	0.95	0.98	0.81	0.97	0.99													
8	0.89	0.93	0.93	0.87	0.93	0.93	0.93												
9	0.93	0.89	0.93	0.76	0.95	0.94	0.94	0.88											
10	0.96	0.89	0.94	0.74	0.94	0.96	0.96	0.89	0.94										
11	0.98	0.91	0.95	0.77	0.97	0.96	0.94	0.88	0.96	0.95									
12	0.94	0.89	0.94	0.76	0.96	0.95	0.93	0.87	0.96	0.94	0.99								
13	0.92	0.94	0.96	0.81	0.97	0.97	0.97	0.91	0.94	0.95	0.96	0.96							
14	0.92	0.92	0.95	0.80	0.97	0.96	0.94	0.88	0.95	0.93	0.99	0.98	0.97						
15	0.95	0.93	0.96	0.77	0.97	0.97	0.95	0.89	0.97	0.95	0.99	0.99	0.98	0.98					
16	0.92	0.89	0.93	0.84	0.95	0.94	0.92	0.85	0.95	0.91	0.99	0.99	0.96	0.98	0.98				
17	0.92	0.86	0.91	0.73	0.91	0.91	0.90	0.84	0.89	0.89	0.95	0.95	0.91	0.95	0.97	0.98			
18	0.92	0.86	0.88	0.71	0.93	0.93	0.90	0.84	0.92	0.91	0.96	0.93	0.89	0.93	0.95	0.94	0.92		

表 3 18 个时间点下阶地 2 的地下水电导率 Spearman 秩相关系数

Table 3 Spearman rank order correlation coefficients for groundwater electrical conductivity in terrace 2 at 18 time points

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	0.91																
3	0.97	0.99															
4	0.77	0.92	0.78														
5	0.93	0.98	0.99	0.76													
6	0.86	0.97	0.94	0.82	0.94												
7	0.91	0.93	0.98	0.74	0.97	0.89											
8	0.90	0.91	0.97	0.80	0.96	0.90	0.99										
9	0.92	0.89	0.99	0.77	0.97	0.88	0.98	0.98									
10	0.88	0.91	0.95	0.77	0.95	0.88	0.97	0.98	0.96								
11	0.79	0.98	0.84	0.95	0.84	0.91	0.77	0.81	0.79	0.79							
12	0.90	0.91	0.97	0.80	0.96	0.90	0.99	1.00	0.98	0.98	0.81						
13	0.89	0.93	0.97	0.79	0.96	0.92	0.98	0.99	0.96	0.96	0.82	0.99					
14	0.87	0.92	0.95	0.84	0.94	0.92	0.97	0.99	0.96	0.98	0.85	0.99	0.99				
15	0.78	0.88	0.90	0.89	0.90	0.93	0.90	0.93	0.87	0.91	0.89	0.93	0.95	0.96			
16	0.86	0.93	0.94	0.90	0.93	0.95	0.93	0.96	0.91	0.94	0.92	0.96	0.96	0.98	0.99		
17	0.87	0.93	0.94	0.82	0.94	0.93	0.94	0.96	0.93	0.96	0.85	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	
18	0.87	0.93	0.96	0.99	0.96	0.94	0.99	0.99	0.95	0.97	0.97	0.99	0.99	0.99	0.98	1.00	0.98

表 4 18 个时间点下阶地 3 的地下水电导率 Spearman 秩相关系数

Table 4 Spearman rank order correlation coefficients for groundwater electrical conductivity in terrace 3 at 18 time points

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	0.85																
3	0.92	0.87															
4	0.99	0.85	0.92														
5	0.90	0.91	0.97	0.91													
6	0.98	0.87	0.94	0.97	0.91												
7	0.97	0.87	0.87	0.97	0.88	0.92											
8	0.94	0.88	0.80	0.93	0.82	0.90	0.98										
9	0.90	0.90	0.78	0.90	0.82	0.87	0.96	0.99									
10	0.96	0.80	0.83	0.94	0.83	0.90	0.99	0.97	0.94								
11	0.85	0.93	0.80	0.83	0.84	0.83	0.92	0.94	0.96	0.90							
12	0.94	0.86	0.80	0.93	0.82	0.88	0.99	0.99	0.97	0.96	0.94						
13	0.94	0.93	0.84	0.93	0.84	0.94	0.95	0.98	0.97	0.92	0.94	0.96					
14	0.93	0.96	0.87	0.93	0.88	0.92	0.94	0.95	0.92	0.91	0.95	0.94	0.98				
15	0.95	0.90	0.83	0.94	0.83	0.93	0.97	0.99	0.97	0.95	0.93	0.98	0.99	0.97			
16	0.78	0.87	0.70	0.75	0.71	0.76	0.86	0.92	0.94	0.85	0.98	0.88	0.92	0.92	0.91		
17	0.96	0.90	0.89	0.96	0.94	0.90	0.99	0.99	0.99	0.98	0.95	0.98	0.95	0.93	0.98	0.95	
18	0.97	0.92	0.93	0.97	0.93	0.97	0.95	0.92	0.92	0.91	0.89	0.93	0.95	0.96	0.94	0.83	0.96

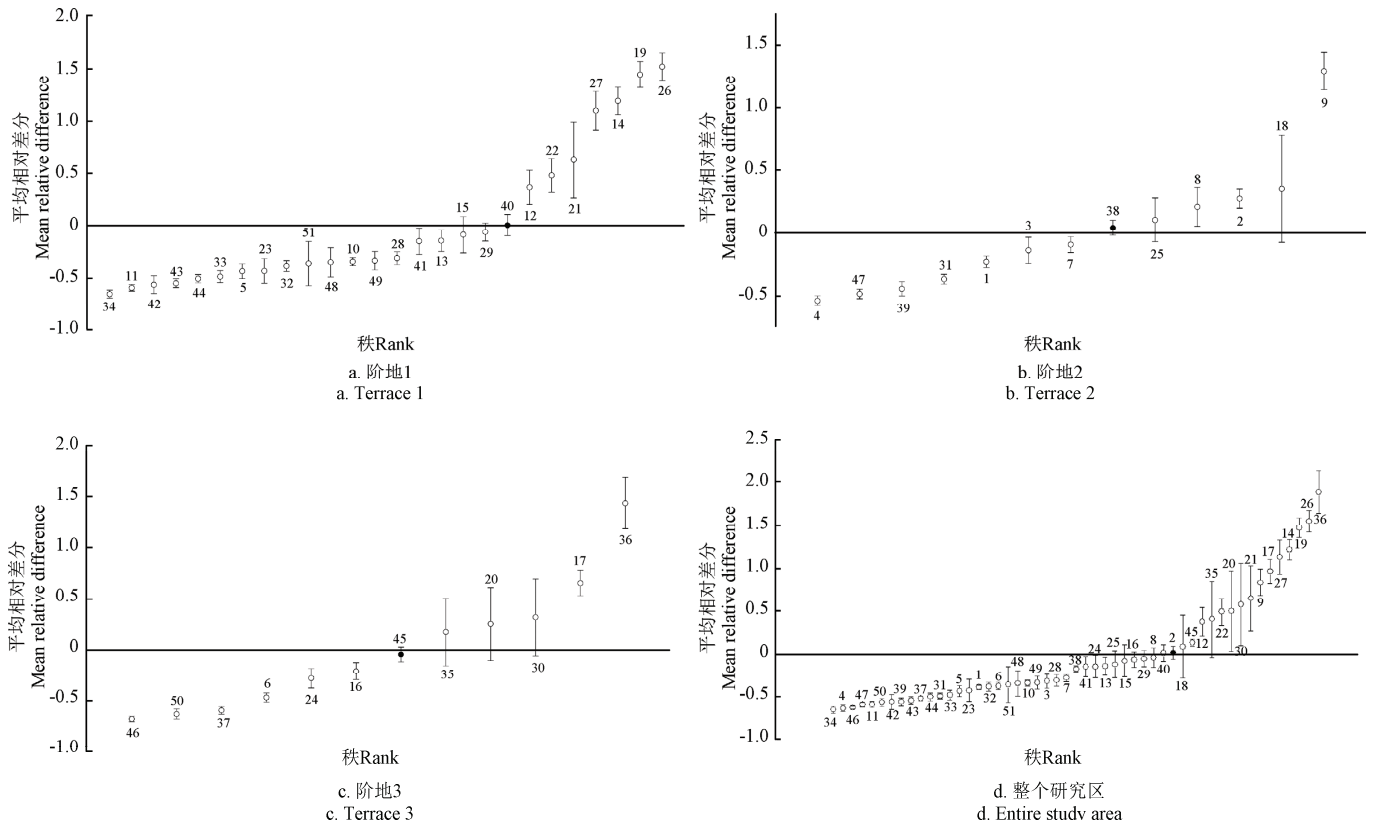
注: 表 2~表 4 中 1 到 18 分别代表时间点 2004 年 1 月、3 月、6 月和 8 月, 2005 年 3 月、5 月、8 月和 9 月, 2006 年 3 月和 8 月, 2007 年 3 月, 2008 年 3 月和 9 月, 2009 年 3 月、9 月和 12 月, 2010 年 3 月和 9 月; 相关系数均在 $P<0.01$ 水平极显著相关。

Note: In table2, table3, table4, 1 to 18 refer to Jan., March, June and Aug. 2004, March, May, Aug. and Sept. 2005, March and Aug. 2006, March 2007, March and Sept. 2008, March, Sept. and Dec. 2009, March and Sept. 2010. Correlations are all significant at $P<0.01$.

3.3 地下水电导率代表性位置点识别

相对差分用来定量确定始终大于、小于或等于平均地下水电导率的位置点。确定这些位置点是进行电导率时间稳定性分析的目的之一。研究区及不同阶地的地下水电导率平均相对差分及其相应的标准差见图 2。由图 2 可以看出, 阶地 1、阶地 2、阶地 3 和整个研究区的地下水电导率均存在代表性位置点, 分别为 40#、38#、45# 和 2# 井点。2#、38#、40# 和 45# 井点的 MRD 值分别为 0.02、0.04、0.01 和 -0.04, 均在 ± 0.05 范围内; SDRD 值分别为 0.07、0.06、0.10 和 0.07, 说明 2#、38#、40# 和 45# 井点满足了作为时间稳定性位置点所需的条件。阶地

1、阶地 2 和阶地 3 的 MRD 最大值井点分别为 26#、9# 和 36#, MRD 最小值井点分别为 34#、4# 和 46#, 这与表 1 中的地下水电导率最大值及最小值井点相一致。MRD 值较大的变化主要是因为灌溉、不稳定的补给源以及井水和补给源较大的电导率差异。相对差分结果表明 26#、9# 和 36# 井点的地下水电导率值总是高于各所在阶地的地下水电导率平均值, 34#、4# 和 46# 井点的地下水电导率值总是低于各所在阶地的地下水电导率平均值。因此, 研究区及不同阶地的地下水电导率均存在代表性位置点, 实地调查发现代表性位置点的共有特征主要为抽水次数相对较少, 补给源多样且主要补给源较为稳定。



注：竖线代表标准差，其上下的数值代表井号。标黑的点为代表性位置点。
 Note: Vertical bars represent \pm standard deviation. Values above or below vertical bars represent well locations. Representative locations are marked in black.

图 2 地下水电导率平均相对差分图

Fig.2 Plots of mean relative differences for groundwater electrical conductivity

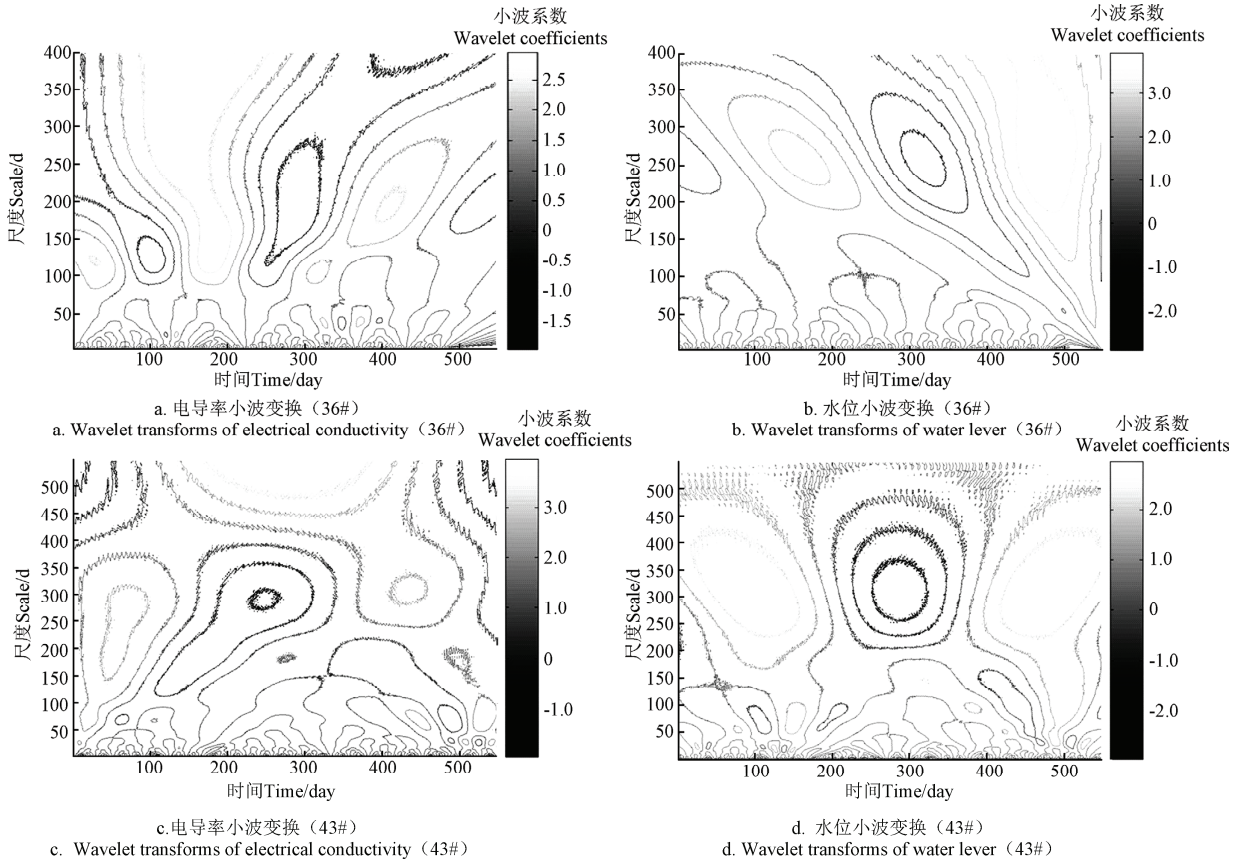


图 3 36#和 43#井点在不同时间尺度下的电导率和水位距平小波变换

Fig.3 Wavelet transforms of groundwater electrical conductivity and groundwater level for wells 36 and 43 at different time scales

3.4 地下水电导率和水位的周期性

基于小波变换分析了地下水水位和电导率的周期性, 2008 年 3 月到 2009 年 9 月 36#和 43#井点的地下水电导率和水位距平值 Morlet 小波变换见图 3。小波系数的大小代表了信号强弱。等值线颜色越浅, 小波系数值越高, 电导率(水位)值越大, 反之则小波系数值越低, 电导率(水位)值越小。在 200 d 之前, 36#井点的地下水电导率在 120 d 尺度震动明显; 在 200 d 之后, 其在 200 d 尺度震动明显。地下水电导率震动周期随着时间的推移逐渐变大。2008 年 3 月至 2008 年 9 月期间, 电导率震动周期小, 电导率变化较快; 2008 年 9 月至 2009 年 9 月期间, 电导率震动周期大, 电导率变化相对缓慢。根据地下水电导率小波系数求得相应尺度的小波方差, 结果有 3 个峰值, 分别对应于时间尺度 90, 200 和 310 d。地下水水位最明显的震动周期为 250 d, 小波方差峰值对应的时间尺度为 60 和 300 d。43#井点地下水电导率在 300 d 尺度震动明显, 小波方差有 3 个峰值分别对应于时间尺度 60, 90 和 280 d。地下水水位最明显的震动周期为 300 d, 小波方差峰值对应的时间尺度为 60, 90 和 360 d。因此, 36#和 43#井点的地下水电导率和水位在不同的时间尺度呈现出不同的周期性, 这与其他学者的研究结果相一致^[28-29]。

4 结 论

洛惠渠灌区地下水从阶地 3 (海拔 > 369~388 m) 流向阶地 2 (海拔 > 360~369 m) 和阶地 1 (海拔 > 342~360 m), 3 个阶地不同监测时间的电导率平均值均表现为阶地 3>阶地 1>阶地 2, 且各阶地间地下水电导率的平均值均存在极显著差异 ($P<0.01$)。灌区地下水主要是微含盐水和中含盐水。3 个阶地不同时间的地下水电导率均属于中等变异, 变异系数的范围为 44%~75%, 电导率越大, 其随时间的变化也相对越大。不同阶地的地下水电导率均表现出强烈的时间稳定性。阶地 1、阶地 2 和阶地 3 的地下水电导率代表性位置点分别为 40#、38#和 45#井点; 而整个研究区的地下水电导率代表性位置点为 2#井点。此外, 基于对 36# (高电导率) 和 43# (低电导率) 井点地下水电导率和水位的小波分析表明研究区地下水电导率和水位存在周期性变化。

洛惠渠灌区地下水电导率具有很强的时间稳定性和周期性, 表明通过地下水电导率代表性位置点来获得研究区地下水平均电导率的方法是可行的。同时, 利用地下水电导率代表性位置点可以为灌区快速准确地确定灌溉时间以降低土壤盐渍化风险提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] Wang Yugang, Li Yan, Xiao Duning. Catchment scale spatial variability of soil salt content in agricultural oasis, Northwest China[J]. Environmental Geology, 2008, 56(2): 439-446.
- [2] FAO. World Agriculture Towards 2000[M]. London: Belhaven Press, 1988.
- [3] O'hara S L. Irrigation and land degradation: implications for agriculture in Turkmenistan, central Asia[J]. J Arid Environ., 1997, 37(1): 165-179.
- [4] Postel S. Pillar of Sand: Can the Irrigation Miracle Last?[M]. New York: Worldwatch Institute, 1999.
- [5] Jalali M. Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: an example from Tajarak, western Iran[J]. Environ Geol., 2007, 52(6): 1133-1149.
- [6] Martinez-sanchez M J, Perez-sirvent C, Molina-ruiz J, et al. Monitoring salinization processes in soils by using a chemical degradation indicator[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 109(1): 1-7.
- [7] Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols[J]. Comput Electron Agric., 2005, 46(1): 103-133.
- [8] Tikhonravova P I. Effect of the water content on the thermal diffusivity of clay loams with different degrees of salinization in the Transvolga Region[J]. Soil Physics, 2007, 40(1): 47-50.
- [9] Gabbasova I M, Suleimanov R R. Transformation of gray forest soils upon technogenic salinization and alkalization and subsequent rehabilitation in Oil-Producing Regions of the Southern Urals[J]. Eurasian Soil Science, 2007, 40(9): 1000-1007.
- [10] Wang Y G, Li Y. Land exploitation resulting in soil salinization in a desert-oasis ecotone[J]. Catena, 2012, 100: 50-56.
- [11] Marlet S, Bouksila F, Bahri A. Water and salt balance at irrigation scheme scale: a comprehensive approach for salinity assessment in a Saharan oasis[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(9): 1311-1322.
- [12] Ding J L, Wu M C, Tashpolat T. Study on soil salinization information in arid region using remote sensing technique[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(3): 404-411.
- [13] Douaik A. Temporal stability of spatial patterns of soil salinity determined from laboratory and field electrolytic conductivity[J]. Arid Land Research and Management, 2006, 20: 1-13.
- [14] Vachaud G, De Silans A P, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822-828.
- [15] Grayson R B, Western A W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response[J]. Journal of Hydrology, 1998, 207(1/2): 68-82.
- [16] Gomez-plaza A, Alvarez-rogel J, Albaladejo J, et al. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(7): 1261-1277.
- [17] Brocca L, Melone F, Moramarco T, et al. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy[J]. Geoderma, 2009, 148(3/4): 364-374.
- [18] De Souza E R, Montenegro A A, Montenegro S M G, et al. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 26-32.
- [19] Gao L, Shao M A. Temporal stability of shallow soil water content for three adjacent transects on a hillslope[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110: 41-54.
- [20] Hu Wei, Shao Mangan, Reichardt Kluas. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 762-773.
- [21] Castrignano A, Lopez G, Stelluti M. Temporal and spatial variability of electrolytic conductivity, Na content and sodium adsorption ratio of saturation extract measurements[J]. European Journal of Agronomy, 1993, 3(3): 221-226.
- [22] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E, et al. SMEX02: field scale

- variability time stability and similarity of soil moisture[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 436—446.
- [23] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability. Pudoc: Wageningen, 1985.
- [24] Grossman A, Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape[J]. *SIAM J. Math. Anal.*, 1984, 15(4): 723—736.
- [25] 杜中, 李占斌, 李鹏, 等. 同位素揭示的洛惠渠灌区地下水盐运动规律[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(6): 343—347. Du Zhong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Study on the transfer of groundwater and salt by stable isotope in Luo-hui Irrigation Scheme[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008, 17(6): 343—347. (in Chinese with English abstract)
- [26] 于国强, 李占斌, 张霞, 等. 土壤水盐动态的 BP 神经网络模型及灰色关联分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 74—79. Yu Guoqiang, Li Zhanbin, Zhang Xia, et al. Dynamic simulation of soil water-salt using BP neural network model and grey correlation analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(11): 74—79. (in Chinese with English abstract)
- [27] Yadav S, Irfan M, Ahmad A, et al. Causes of salinity and plant manifestations to saltstress: A review[J]. *J. Environ. Biol.*, 2011, 32(5): 667—685.
- [28] 李瑛, 郭效丁, 魏永强, 等. 洛惠渠灌区地下水电导率特征分析[J]. *地下水*, 2012, 34(5): 64—67. Li Ying, Guo Dingxiao, Wei Yongqiang, et al. Study on the electrical conductivity characteristics of groundwater in Luohuiqu Irrigation District[J]. *Ground water*, 2012, 34(5): 64—67. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘海波, 李占斌, 李鹏, 等. 洛惠渠灌区典型样区地下水位与电导率关系研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 27—30. Liu Haibo, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Variations of groundwater level and electrical conductivity in Luohui Irrigation Scheme[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(2): 27—30. (in Chinese with English abstract)

Temporal stability of groundwater electrical conductivity in Luohuiqu irrigation district

Xu Guoce^{1,2}, Liu Haibo³, Shen Zhenzhou¹, Wang Jinhua¹, Ran Dachuan¹, Li Zhanbin², Li Peng²

(1. Key Laboratory of the Loess Plateau Soil Erosion and Water Process and Control, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 2. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Beijing Soil Conservation and Ecology Engineering Consulting Company Limited, Beijing, 100055, China)

Abstract: Soil salinization is currently an important limiting factor on agriculture development in irrigation areas all over the world. Electrical conductivity (EC) is one of the main indicators which are used to determine whether the irrigation water will cause soil salinization. It is of important significance to study the temporal and spatial variation of groundwater EC for agricultural irrigation in irrigation districts. This study was conducted to examine the temporal stability and periodicity of groundwater EC in irrigation districts. To accomplish this, 51 observation wells were selected for analysis of groundwater EC in Luohuiqu irrigation district which was an important agricultural production base in Shaanxi Province, China. The 51 observation wells belonged to 3 different terraces which were Terrace 1, 2 and 3. The altitudes of the 3 terraces were >342-360, >360-369 and >370-388 m, respectively. The numbers of observation wells in Terrace 1, 2 and 3 were 26, 13 and 12, respectively. Water samples were collected from 2 m below the well water surface to measure the groundwater EC and temperature at each site. Well 36 (high EC) and 43 (low EC) were selected for long-term observation. A CTD-Diver (USA) groundwater level data logger was adopted for measuring and recording the groundwater EC, temperature and level. According to the long sequence monitoring results of groundwater EC for the 51 observation wells, relative difference analysis and non-parametric Spearman's rank correlation test were used to check for temporal stability of groundwater EC, while Morlet wavelet analysis was applied to study the periodic variation of groundwater EC and groundwater level of high and low salinity wells. The results indicated that the order of mean groundwater EC values of the 3 terraces at different time instants was Terrace 3 > Terrace 1 > Terrace 2. Significant difference existed among the mean groundwater EC values of the 3 terraces ($P < 0.01$). The groundwater EC values of the 3 terraces at different time instants all indicated moderate spatial variability, with coefficient of variation (CV) values ranging from 44% to 75%. Based on the mean EC value of each observation well, 21 wells were slightly saline and 30 wells were moderately saline. The ranges of minimum and maximum value of groundwater EC were 0.08-0.14 and 0.50-1.00 S/m, respectively. The most of Spearman rank correlation coefficients for groundwater EC were close to 1 ($P < 0.01$), which indicated that the groundwater EC of the 3 terraces exhibited strong temporal stability. But the temporal stability of groundwater EC had little relationship with the terraces which the corresponding well sites belonged to. The representative locations of mean groundwater EC for Terrace 1, 2 and 3 were Well 40, 38 and 45, respectively. The representative location of mean groundwater EC for the entire study area was Well 2. Based on the Morlet wavelet analysis of the groundwater EC and water level of Well 36 (high EC) and 43 (low EC), both of the groundwater EC and water level showed periodic variations. The groundwater EC and water level indicated different vibration periods on different time scales for both Well 36 and 43. The change in groundwater EC on small time scales was mainly affected by lateral recharge sources. The groundwater EC and water level showed an obviously inverse phase on large time scales. In conclusion, the groundwater EC has strong temporal stability and periodicity in Luohuiqu irrigation district. The representative location with mean groundwater EC can be used to monitor the mean groundwater EC of the study area. Irrigation time should be fully considered in irrigation districts to avoid soil salinization. The representative location with mean groundwater EC can provide great guidance to determine the irrigation time quickly and accurately to reduce the risk of soil salinization.

Key words: irrigation canals; groundwater; conductivity; temporal stability; Morlet wavelet analysis