June, 2003

文章编号: 1672 3031 (2003) 01-0045-07

区域水土特性参数时空变异分布特征及相关分析

许迪¹, 毘仑¹, 蔡林根¹

(1. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心,北京 100044)

摘要: 作者应用地质统计学原理与方法,在山东簸箕李引黄灌区开展大尺度区域水土特性参数时空变异性的研究,描述农田排水、地下水、表层土壤中含盐量的空间与时间变化分布趋势和特征,分析其间存在的相关关系。 结果表明,在一个完整的水文循环年内,研究区域的水土特性参数之间具有相近的空间变异分布状态和特点, 但却表现出不同的时间变异分布趋势与特征。农田排水和表层土壤的含盐量随季节变化的分布状态在灌区上、 下游相对稳定,在中游却变化明显;地下水的盐分浓度在整个灌区的分布状况没有呈现出明显的时间变异性。 在春季至初夏时段内,农田排水中含盐量的增加似乎对地下水水质的影响较小,而对表层土壤积盐状况影响较 大。研究成果为灌区制定合理的水资源利用与农田水土管理策略提供了理论依据。 关键词:水土特性;时间与空间变异性;农田排水含盐量;地下水含盐量;表层土壤含盐量

中图分类号: S274 文献标识码: A

对区域水土特性的时间与空间变异分布特征开展定量化研究一直是人们关注的热点问题^[1,2],但 以往多数研究着重描述不同区域尺度下水土特性的空间变异及分布特征^[3-5],而对区域水土特性的时 间变异性研究相对较少^[6]。由于区域水土特性的时空变异分布状况及特征对维持作物正常生长的水土 环境条件有重要作用,故开展相应的研究可为制定合理的区域水资源利用与农田水土管理策略提供科 学的依据。本文应用经典统计学方法和地质统计学原理与方法,在一个完整的水文循环年内,研究大 尺度区域的水土特性时空变异性,采用 Kriging 插值法绘制区域农田排水、地下水、表层土壤中含盐 量的时空变化等值线图,描述这些区域水土特性参数的时空变化分布趋势与特征,分析其间存在的相 关关系。

1 试验与方法

1.1 研究区域 研究区域位于黄河下游左岸的山东省簸箕李引黄灌区,地处东经 117°14~ 117°58, 北纬 37°7~38°14,总面积 2243km²,设计灌溉面积 11 万 hm²。该区地貌为典型的黄河冲积平原,属 于华北半干旱季风气候,年平均降水量 586mm,年平均蒸发量 1240mm,年平均气温 12℃,年平均日 照时数 2250h。区内自然地形是西南方向的上游高与东北方向的下游低,地面坡度 1/5000~ 1/15000; 土壤类型为潮土,表层土质主要有砂土、砂壤土、粘壤土和粘土等。受年降水时空分布不均的影响, 当地具有"春旱、夏涝、晚秋旱"的气候特点,种植模式以冬小麦~夏玉米一年两作为主,可利用的 农业水资源有雨水、黄河水和地下水。

1.2 区域水土特性及其采样方法 由于灌区引用的黄河水质能达到国家规定的地面水 III类标准^{1/1}, 可满足农田灌溉对水质的基本要求,故选择农田排水、地下水、表层土壤的含盐量作为区域水土特性 参数开展时空变异性的研究。考虑到灌区大部分斗、农两级灌溉渠系在输水的同时又兼作排水沟使 用,进入沟渠的排水和灌溉退水直接作为二次水源用于灌溉,为此有必要把进入沟渠的农田排水含盐 量作为区域水土特性参数之一加以分析。

收稿日期: 2003-05-10

作者简介:许迪(1957-),男,北京人,博士,教授级高级工程师,主要从事节水农业理论与技术研究。

基金项目: 中国- 欧盟重大科技合作项目 (ERBIC18CT970170)

以农田排水电导率 *EC*^{*d*} 和地下水电导率 *EC*^{*g*} 作为定量水中盐分浓度的参数,在全灌区相对均匀 布设的定位点处,利用便携式电导仪 (YSI- MODEL- 33) 现场采样,直接测定 *EC*^{*d*} 和*EC*^{*g*}。农田排 水和地下水的 3 次采样时间分别是作物秋播后的 1999 年 10 月、冬小麦开花灌浆期的 2000 年 5 月和夏 玉米生长初期的 2000 年 7 月。农田排水的水样取自 77 处定点沟渠,由于后 2 次采样时个别渠沟内无 水,3 次采样的样品数分别为 77、68 和 76 个;地下水的水样取自 50 处定点农用机井,每次的样品数 量均为 50 个。采用 1:2.5 土水比浸出液电导率 *EC*^{*s*} 作为定量表层土壤盐化的参数,在灌区各定位点 处,现场取 0~ 30m 表层土壤的混合样品在室内测定 *EC*^{*s*} 。表层土壤的 2 次采样时间分别在夏玉米 收获的 1999 年 9 月和冬小麦收获的 2000 年 6 月。样本数量分别为 100 和 119 个。

1.3 统计分析方法 新复极差显著性检验方法 (DMRT) 被用来比较水土特性参数样本间的平均值差 异^[9]。该法的特点是可采用不同的显著差数标准比较所有参数的平均值,当 2 个样本均值的绝对差大 于最小显著极差 *LSR*_a 时,即可认为两样本间在 α 水平上差异显著。

$$LSR_a = SE \cdot SSR_a \tag{1}$$

式中: SE 为参数平均值的标准误差; SSR。可通过查表得到。

采用地质统计学中的 Kriging 插值法¹⁰ 进行参数空间样点的插值计算。该法是根据未知点周围的 若干已知点的信息,依据空间分布相关距离范围内各已知点参数间建立的空间相关结构关系,对未知 参数进行估值插补。参数的空间相关结构关系一般可借助半方差函数 Y (*h*)表示如下:

$$Y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$
(2)

式中: x_i 为已知点的空间坐标位置; $Z(x_i)$ 为相应点的参数值; h为两已知点的间距; N为已知点 数量。在式 (2)中,随 h逐渐增大, Y(h)增大, 当 $h \ge R$ 时, $Y(h) = s^2$,即半方差等于方差, 此时 R 被称为该参数的空间分布相关距离。

Kriging 插值法建立在估值 $Z^*(x_0)$ 对真值 $Z(x_0)$ 的无偏估计以及估值与真值两者之差的方差最小基础假设上,由于半方差函数给出相邻成对采样点之间的参数相关关系,故任一未知内插点 x_0 处的参数估值 $Z^*(x_0)$ 可通过环绕其四周且处于空间分布相关距离范围内的 n 个已知点 $Z(x_i)$ 估算如下:

$$Z^{*}(x_{0}) = \sum_{i=1}^{n} \lambda Z(x_{i})$$
(3)

式中: λ 为待定的权重因子,由式(2)给出的半方差函数计算得到 $^{[11]}$ 。

2 结果与讨论

2.1 区域水土特性参数的统计特征值及对比分析 表 1 给出区域水土特性参数的统计特征值结果。 所有特性参数均服从对数正态分布, EC_d 和 EC_g 较高的偏态系数值 C_s 和峰度系数值 C_e 表明,两个参数的概率密度分布曲线具有非对称性,且极值差较大,农田排水 EC_d 和地下水 EC_g 的区域空间分布 状态呈现出以低值为主、极差较大的结构形式;相比之下,表层土壤 EC_s 的空间分布较为均匀对称。

从区域水土特性参数的样本均值来看,在观测的周年时段内,农田排水 *EC*^{*d*} 和地下水 *EC*^{*g*} 始终高于表层土壤 *EC*^{*s*};从衡量区域水土特性参数空间变异性的变差系数 *C*^{*x*} 来看,在一个完整的水文循环年内,不同采样时间测定的农田排水含盐量的 *C*^{*x*} 值都大于 1,排水水质对气候条件变化和人为活动干扰的影响最为敏感,呈现出较强的空间变异性,而 *EC*^{*g*} 和*EC*^{*s*} 的 *C*^{*x*} 值在 0.4~ 0.8 范围内变动,地下水和表层土壤的含盐量表现出中等程度的空间变异性^[11]。

2.2 区域水土特性空间相关性及其时间变化 图 1 所示是用来描述区域水土特性参数时空变异结构 的相对半方差函数,其中 $Y_s(h) = Y(h) / s^2$ 。由于所有参数的相对半方差函数 $Y_s(h)$ 的上限值都 大于 1,即 Y(h) > s^2 ,则采样区域具有足够大的空间尺度范围来反映其各自的空间变异性。当 h=0 时,所有水土特性参数的 $Y_s(0) \neq 0$,即存在着基底方差,这是由最小采样距离内的量测误差和参

数变异性引起的。

	农田排水 ECd			地下水 ECg			表层土壤 EC s	
	1999年10月	2000年5月	2000年7月	1999年10月	2000年5月	2000年7月	1999年9月	2000年6月
样本数量 n	77	68	76	50	50	50	100	1 19
均值	2 9a	5. Ob	3. 8c	4. 5a	4 8a	4. 6a	0. 9a	1. 5b
最大值/ (ds/m)	27.6	27.9	31.0	18.9	19.0	18. 1	2.3	2.8
最小值/ (ds/m)	0 6	0. 7	0.8	1.2	1.2	1. 2	0.2	0.2
标准偏差 s/ (ds/m)	4.7	5.9	5.6	3. 5	36	3. 3	0.6	0.8
变差系数 C_v	1.6	1. 1	1.5	0.8	0 7	0. 7	0.7	0.4
偏态系数 C_s	34	1. 7	2.9	2.2	1.9	2. 0	1.0	- 0. 1
峰度系数 C_e	14 9	5.3	11.6	7.9	7.3	7.8	2.8	1. 6

表 1 区域水土特性参数统计特征值

注: 同一参数相比, 具有相同字母的均值间在0.05 水平上无显著差异。



图1 区域水土特性参数的相对半方差函数及其时间变	₹化
--------------------------	----

区域水土 特性参数	采样时间	拟合模型	基底方差	基台值	相关距离 <i>R/</i> km	基底方 <i>莙</i> /基台值 (%)
	1999年10月	指数函数	0.22	21.6	60	1. 0
EC_d	2000年5月	指数函数	0.35	35.0	75	1. 0
	2000年7月	指数函数	0.32	31.6	62	1. 0
	1999年10月	指数函数	0.25	12. 5	60	2. 0
EC_g	2000年5月	指数函数	0.25	12.6	62	2. 0
	2000年7月	指数函数	0.22	10. 9	63	2. 0
	1999年9月	指数函数	0.01	0.4	30	2. 5
EC_s	2000年6月	指数函数	0.02	0. 6	35	3. 3

表 2 区域水土特性参数的相对半方差模型及其拟合参数

区域水土特性参数的相对半方差模型及其拟合参数见表 2。其中各水土特性的空间相关性可根据 基底方差与基台值的比值大小进行分类,当该比值小于 25% 时,空间相关性强;在 25%~75% 之间, 空间相关性中等;大于 75% 则意味着较弱的空间相关性^{12]}。按此标准划分,研究区域的水土特性都 呈现出较强的空间相关性,并具有较大的空间分布相关距离(30km~75km)。图 1 和表 2 的结果还表 明,尽管具有较强的空间相关性,但区域水土特性参数的空间相关程度随其变差系数的改变会出现季 节性变化。2000 年 5 月和 6 月观测的 EC_d 和 EC_s 变差系数较之前年 10 月和 9 月分别减少 31.2% 和 42.9%,其相关距离 R 由 1999 年 10 月和 9 月的 60km 和 30km 分别增加到 75km 和 35km,参数变异性 的相对减弱增大了其空间分布相关距离,相对增强了农田排水 EC_d 和表层土壤 EC_s 的空间相关性; 而 3 次采样得到的 EC_g 变差系数之间的差异很小,其相关距离的变化很小,地下水 EC_g 的空间相关 程度基本不变。

2.3 区域水土特性时空变异分布趋势与特征 图 2 给出利用 Kriging 内插估值法绘制的农田排水 *EC*_a 区域空间分布等值线及时间变异分布趋势。在整个灌区范围内,*EC*_a 从上游的 1ds/m 过渡到中游的 2 ~ 6ds/m,并在下游的东北角达到最大值 30ds/m,其从上游到下游、从西南到东北的分布过程显示出

由低值到高值、大部平缓、局部骤增的空间变异分布趋势与特点。不同采样时间获得的 *EC*^{*d*} 均值间 呈现出显著性差异,该均值由秋播后(1999年10月)的2.9ds/m增加到次年冬小麦灌浆期(2000年5 月)的5ds/m,随后又下降至夏玉米生育初期(2000年7月)的3.8ds/m,农田排水中盐分的时间变异 性较强。其中较低的 *EC*^{*d*} 均值分别是在夏季汛期的前期和结束后测定的,频繁的降雨有助于稀释排 水溶液中的离子浓度,使 *EC*^{*d*} 逐渐下降,而较高的 *EC*^{*d*} 则发生在冬小麦需水高峰期,春旱少雨加之 强烈的水面蒸发导致农田排水水质的恶化。图2显示出年内气候状况的变化虽然对灌区上游农田排水 *EC*^{*d*} 较为平缓的分布趋势和下游东北角骤然递增的现象没有产生明显的影响,但在春旱的5月却显著 增大了中下游的 *EC*^{*d*} 值,形成了灌区上、下游处农田排水含盐量的变化分布趋势相对稳定、中下游 却变动较大的区域时间变异分布趋势与特征。



图 2 EC_d 区域空间分布等值线及时间变异分布趋势

地下水 *EC*_g 区域空间分布等值线及时间变异分布趋势见图 3。在全灌区范围内, *EC*_g 从上游的 2ds/m 过渡到中游的 4~5ds/m,并在下游东北角达到最大值 19ds/m,其空间变化分布趋势和特点相近 于农田排水含盐量的状况。地下水 *EC*_g 均值由秋播后(1999 年 10 月)的 4.5ds/m 增加到次年冬小麦 灌浆期(2000 年 5 月)的 4.8ds/m,随后又下降至汛期初始(2000 年 7 月)的 4.6ds/m,该均值随季节 的变化没有表现出显著性差异,地下水中盐分的时间变异性较弱。图 3 显示出灌区上游的地下水 *EC*_g 分布较为平缓,但在下游东北角处却突然增大,具有较高的增长梯度,构成了地下水含盐量的变化分 布相对稳定的区域时间变异分布趋势与特征。

表层土壤 *EC*。区域空间分布等值线及时间变异分布趋势如图 4 所示, *EC*。从上游的 0.2d/m 增加 到下游的 2.8d/m, 表现出与 *EC* 和*EC* 相类似的空间变化分布趋势和特点。表层土壤 *EC* 均值由秋 收时(1999 年 9 月)的 0.9ds/m 增加到次年冬小麦收获时(2000 年 6 月)的 1.5ds/m, 两者间呈现出 明显的差异, 表层土壤含盐量的时间变异性较强。夏季降雨淋洗脱盐使表层土壤盐分减小, 并在冬季 保持相对稳定, 而春季强烈的土壤蒸发积盐和灌溉水中盐分的淀积, 又造成表层土壤含盐量增加。受 当地季风气候的影响, 表层土壤盐分的季节性积累与脱盐过程交互更替, 呈现出明显的黄淮海平原周 年土壤水盐动态基本特征^[13]。尽管年内气候条件的变化对灌区上游西南角表层土壤 *EC*。低值和下游





高值的分布趋势没有产生明显的影响,但却引起中游 EC。的明显波动,构成了表层土壤含盐量在灌区上、下游的变化分布趋势相对稳定、而在中游的变动却较为明显的区域时间变异分布趋势与特征。





2.4 区域水土特性参数相关分析 区域农田排水、地下水、表层土壤含盐量的时空分布状况及统计 特征值之间存在着相关关系。图 5 给出在一个完整水文循环年内,区域农田排水 *EC*_a 均值与地下水 *EC*_a 均值间的相关关系,两者间存在着明显的正比函数关系。在全灌区范围内,*EC*_a 和*EC*_g 呈现出秋

季 10 月较低 (2.9ds/m 和 4.5ds/m)、次年春季 5 月较大 (5ds/m 和 4.8ds/m) 和夏季 7 月减小 (3.8ds/m 和 4.6ds/m) 的变化趋势特征, 且受区域自然气候条件与水土环境条件相对稳定的作用, 该趋势应具 有周年动态循环的特点。图 5 的结果还表明, 相应于年内农田排水 *ECa* 均值 72% 的增幅, *EC*g 只增 长了 7%, 变幅非常平缓,这意味着区域农田排水盐分浓度的增加似乎对地下水水质的影响较小。



图 5 EC_d 与 EC_{σ} 的相关关系

图 6 EC_d 和 EC_g 对 EC_s 的影响

区域农田排水 EC_a 和地下水 EC_g 的变化对表层土壤含盐量的影响如图 6 所示,农田排水水质的下降对表层土壤盐分浓度的影响显而易见。当 EC_a 和 EC_g 均值分别从秋季的 2.9ds/m 和 4.5ds/m 上升到次年 6 月的 (5 月和 7 月的平均值) 4.4ds/m 和 4.7ds/m 时,前者增长了 51.7% 而后者仅为 4.4%,地下水 EC_g 的变化十分微弱,与此相对应,表层土壤 EC_s 增长了 66.7%,区域表层土壤盐分的季节性变化似乎受农田排水水质降低的影响更大。

3 结论

在具有区域尺度的山东簸箕李引黄灌区范围内,农田排水、地下水、表层土壤的含盐量等水土特 性参数在一个完整的水文循环年中表现出相近的区域空间变异分布趋势和特点,而在区域时间变异分 布趋势与特征上却存在较大差别。农田排水 *EC*^d 与表层土壤 *EC*^s 在灌区上游和下游的分布状态相对 稳定,但在中游的分布状况却各自呈现出明显的季节性差异;地下水 *EC*^g 在全灌区范围内的分布状 况没有表现出显著的时间变异趋势。在区域水土特性变化较为强烈的春季至初夏时段内,明显下降的 农田排水水质是导致表层土壤盐分加重的主要影响因素之一,而对地下水水质的影响却似乎较弱。

基于农田排水 ECa 和地下水 ECg 的区域时空变化分布特征,依据联合国粮农组织 FAO 制定的灌溉水质分类标准^[14],在夏秋两季,可利用小于 1dg/m 的农田排水和地下水在簸箕李灌区上游进行灌溉,作物生长不受影响,而在灌区中游的大部分地区,使用小于 3dg/m 的农田排水和地下水开展灌溉对作物生长无明显的影响,但在春季期间,利用小于 3dg/m 水质的排水和地下水的范围仅局限在灌区上游和中游的局部地区;在灌区下游,大于 3dg/m 的农田排水和地下水在任何季节内均不适宜于农业灌溉。根据表层土壤含盐量的区域时空变化分布特征,并参照美国盐碱实验室提出的盐碱土分级标准^[15]和不同土水比浸出液电导率间的关系^[16],在簸箕李灌区的上游和中游地区,小于 1dg/m 的表层土壤盐分状态对秋季作物的生长影响不大,但对春季作物,由于中游地区表层土壤的含盐量已超过 1dg/m,作物产量可能受到限制;在灌区下游,高于 1dg/m 的表层土壤盐分状况将会限制春秋两季作物的 正常生长,造成程度不一的减产,尤其是在下游东北角,较重的表层土壤盐化程度会严重影响作物产量。研究成果为灌区合理开发利用各种水资源、制定科学的区域农田水土管理策略提供了理论依据。

参考文 献:

- [1] Hillel D. Research in soil physics: a review [J]. Soil Sci., 1991, 151: 30-34.
- [2] Webster R, et al. Statistical methods in soil and land resource survey [M]. Oxford University Press, 1990.

- [3] Russo D. A geostatistical approach to solute transport in heterogeneous fields and its applications to salinity management
 [J]. Water Resour. Res., 1984, 20 (9): 1260-1270.
- [4] 许迪, Schmid R. 田间土壤特性的空间相关结构分析及其分布描述 [J]. 灌溉 排水, 1996, 15 (4): 16–20.
- [5] 胡克林,李保国,等.农田土壤养分的空间变异性特征 [J].农业工程学报,1999,15 (3):33-38.
- [6] 孙波,赵其国,闾国年.低丘红壤肥力的时空变异 [J].土壤学报, 2002, 39 (2): 190- 198.
- [7] GB5084 92, 农田灌溉水质标准 [S].
- [8] Klute A. Methods of soil analysis [M]. Agronomy 9 (1), Am. Soc. Agron. Madison, Wisc, 1986.
- [9] Steel R G D, Torrie J H. Principles and procedures of statistics A biometrical approach [M]. McGraw-Hill Int. Book Co., Tokyo, 1981.
- [10] Matheron G. Les variables regionalisees et leur estimation [M]. Masson Press, Paris, 1965.
- [11] Hillel D. Application of soil physics [M]. Academic Press, New York, 1980.
- [12] Miller M P, et al. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, 52: 1133-1141.
- [13] 中国农业科学院. 黄淮海平原治理与农业开发 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1989.
- [14] FAO. Water quality for agriculture [M]. Rome Italy, 1985.
- [15] 李学垣. 土壤化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [16] Shaw R. Estimation of the electrical conductivity of saturation extracts from the electrical conductivity of I 5 soil: water suspensions and various soil properties [R]. Project Report Series QO94025, Dept. of Primary Industries, Queensland, Australia, 1994.

Analysis on temporal and spatial variability of soil and water parameters in a large irrigation area

XU Di¹, DING Kurr lun¹, CAI Lirr gen¹

(1. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100044, China)

Abstract: By applying the geo-statistical techniques to a large area in the Bojili Irrigation District, the authors conducted a study on the temporal and spatial variability of the regional soil and water parameters, i. e., the amount of salt in surface drainage water and irrigation return flow, the amount of salt in groundwater and the surface soil salinity. The tendency and features of the temporal and spatial distributions and changes were depicted and the correlations among these parameters were analyzed. The results showed that, within a full hydrological cycle year, the spatial variation of these parameters possessed similar distribution features, while the temporal variation appeared with different distribution tendency and features. The distributions of the amount of salt in surface drainage water and irrigation return flow as well as the surface soil salinity in different seasons were relatively stable in the upper and lower areas, but varied significantly in the middle area of this irrigation project. The distributions of the amount of salt in groundwater at different seasons showed a low temporal variability. In the period of spring to early summer, the increased salinity of surface drainage water and irrigation return flow likely had little impact on the groundwater quality, but did have great impact on the increased surface soil salinity. The results would be helpful to formulate a soil and water management strategies for rational utilization of all kinds of water resources in this region.

Key words: soil and water parameters; temporal and spatial variability; amount of salt in surface drainage water and irrigation return flow; amount of salt in groundwater; surface soil salinity

(责任编辑: 吕斌秀)