

基于灰色关联分析的土壤水盐动态变化研究

张霞¹, 沈炳岗¹, 王亚萍¹, 李占斌^{2,3}

(1. 陕西省环境科学研究院, 陕西 西安 710061; 2. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 根据洛惠渠灌区多年观测资料与实地调查, 采用灰色关联法对灌区地下水矿化度、埋深与土壤含盐量的动态关系进行了分析。阐明了 3 者之间的年际动态变化规律和耦合关系, 建立了灌区土壤水盐动态耦合关系模型。结果表明, 地下水矿化度是影响土壤含盐量的主要因素, 地下水埋深对盐分的转移也起着重要的作用, 各因子之间相互作用, 形成了复杂条件下的耦合关系; 该灌区处于脱盐和相对稳定状态, 受外界因素影响, 土壤含盐量变化趋势与地下水矿化度和地下水位变化趋势不一致; 基于地下水矿化度和地下水埋深的土壤水盐耦合关系模型具有较高的预测精度, 能够很好地定量描述土壤水盐动态变化与其影响因子之间的响应关系。

关键词: 灰色关联度分析; 地下水矿化度; 地下水埋深; 土壤含盐量; 水盐动态

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)04-0267-04

中图分类号: S15, S156.4

Investigation on Soil Water—Salt Dynamics Based on Grey Correlation Analysis

ZHANG Xia¹, SHEN Bing-gang¹, WANG Ya-ping¹, LI Zhan-bin^{2,3}

(1. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an, Shaanxi 710061, China;

2. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on field-observed data from Luohui Irrigation District, grey correlation analysis method was applied to analyze the relations between groundwater mineralization, depth and soil salt content. The model of soil water—salt dynamics was then established based on the analysis. The results show that groundwater mineralization was the main factor affecting soil salt contents, and also played an important role in transferring salts. The interaction among various factors formed coupling relationship under the complicated condition. As affected by external factors, it can be preliminarily determined that the soil of the Irrigation District was in desalination condition and in a relative stable state. The variation tendency of soil salt content differed from those of groundwater mineralization and groundwater depth. The quantitative model established in this study described well the response of groundwater dynamic to various factors with sufficient high accuracy. The combination provides a feasible method for analyzing the mechanism of soil water—salt dynamics under the condition of shallow groundwater during the crop growing season.

Keywords: grey correlation degree analysis; groundwater mineralization; groundwater depth; soil salt content; water—salt dynamic

我国西北干旱半干旱地区, 土地资源丰富, 光热条件充足。灌溉农业是当地农业经济发展的主要形式。洛惠渠灌区是关中平原八大灌区之一, 土地疏松肥沃, 有泾、渭、洛等河提供水源, 十分适宜耕作, 灌溉

历史悠久, 是关中平原上最具生产潜力、最具活力的农林牧业生产基地。然而, 随着灌溉农业迅速发展, 灌溉面积不断增加, 配套工程滞后, 灌溉方法不合理, 排水系统不完善, 土地不平整等问题愈发凸显, 加之

收稿日期: 2011-08-15

修回日期: 2011-09-26

资助项目: 中国博士后基金项目“白龙江流域暴雨泥石流运动机理及数值模型研究”(2011M501445); 国家自然科学基金项目“矿渣型泥石流起动机理及临界参数研究”(40872208); 国家自然科学基金项目“基于小流域淤积信息的侵蚀产沙与侵蚀环境变化响应研究”(40971161)。

作者简介: 张霞(1982—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 硕士, 工程师, 主要从事生态环境研究工作。E-mail: zhangxia20002000@163.com。

通信作者: 李占斌(1962—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究, E-mail: zhanbinli@126.com。

强烈的蒸发以及土壤母质特性等,导致地下水位下降,潜水蒸发剧烈,土壤严重积盐,盐碱地面积呈扩大趋势,严重威胁当地的工农业生产^[1-4]。因此,充分了解当地的水资源情况,对该灌区地下水资源的动态特征以及水质评价进行分析,对促进当地地下水资源的合理开发利用,使之发挥更大的社会效益有一定的指导意义。

土壤水盐运移是研究土壤盐碱化及其防治和改良的核心问题,土体中水盐运动理论研究起源于 Darcy 定律,国内外研究者在水盐运移规律方面做了大量工作^[5-7]。我国对新疆自治区渭干河灌区、宁夏自治区银北灌区及内蒙古自治区河套平原等大型灌区均有研究^[8-9],并且已取得显著成效。本研究依据洛惠渠灌区多年观测资料,应用灰关联度初步分析了洛惠渠灌区近几十年来地下水盐动态特征,以及与土壤盐分相关的影响因素,以期为灌区的水盐调控管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

洛惠渠灌区位于陕西省关中平原东部大荔县(北纬 $34^{\circ}36'$ — $35^{\circ}02'$,东经 $109^{\circ}43'$ — $110^{\circ}19'$)境内,海拔高度为 329.0—533.5 m,属暖温带半干旱大陆性季风气候;年平均气温 13.4°C ,年平均降水量 922.9 mm,年平均蒸发量 2 442 mm,年平均日照 2 341.2 d,全年无霜期 212 d,光热充足,资源丰富。多年来,由于河源来水不足,灌区年缺水约 $7.00 \times 10^7 \text{ m}^3$,需要开采地下水作为灌溉水源。因此研究分析地下水化学性质,对利用地下水灌溉具有重大意义^[10-11]。

1.2 研究方法

为了长期监测灌区地下水和土壤水盐变化特征,遍布整个灌区设立了地下水监测井网,监测井点的布设充分考虑了环境水文地质条件、地下水开采情况、区域水化学特征及耕作区盐碱化轻重等因素。研究主要采用观测井网来分析地下水盐动态特征,水样取自液面下 3 m 处,并测量其水位、矿化度及对应井处的土壤含盐量。灌区地层北升南降,根据所布设的各井点地理位置及海拔,将整个灌区分为 3 层阶地:第 1 阶地:342~360 m;第 2 阶地:360~369 m;第 3 阶地:370~388 m。分析 1980—2003 年气象因素对灌区地下水矿化度、地下水埋深的影响,结合灰色关联分析方法对地下水矿化度、地下水埋深与土壤含盐量之间的关系进行分析,对该灌区土壤质量进行综合评价。

1.3 灰色关联分析的基本原理

灰色关联是灰色系统的基本概念,它是指事物之

间的不确定关联,或系统因子之间、因子对主行为之间的不确定关联。基本思路是根据各比较数列集构成的曲线族与参考数列构成的曲线之间的几何相似程度,来确定比较数列集与参考数列构成曲线的几何相似程度,其形状越相似,其相关联程度越大^[12-13]。

设参考数列 $Y_0(k)$,比较数列为 $Y_i(k)$, $i=1,2,3,\dots,m$,序列长度为 N ,研究的问题在于确定 $Y_i(k)$ 与 $Y_0(k)$ 的密切程度,即求 $Y_i(k)$ 与 $Y_0(k)$ 序列的相关度。

由于各数列具有不同的量纲,且数量级不同,为了保证能得到正确的分析结果,首先应对原始数据进行变换处理,将其化为无量纲数列,以便于分析计算。采用标准化变换,即先求出各序列的平均值和标准差,然后将各个原始数据减去平均值后再除以标准差,这样得到的新数据序列 $x_0(k)$ 与 $x_i(k)$ 即为标准化序列。点关联系数的定义为:

$$\xi_i(k) = r[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min_{i \in m} \min_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i \in m} \max_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i \in m} \max_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式中: $\xi_i(k)$ ——第 k 时刻比较曲线 x_i 对参考曲线 x_0 的相对差值,这种形式的相对差值称 x_i 对 x_0 的在 k 时刻的关联系数; ρ ——分辨系数,取值一般在 $0 \sim 1$ 之间,这里取 $\rho=0.5$ 。

有了关联系数计算公式,根据灰关联空间所述,关联度的计算公式为:

$$r_{oi} = r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r[x_0(k), x_i(k)] \quad (2)$$

若将 $r[x_0(k), x_i(k)]$ 用 $\xi_i(k)$ 代替,用 r_i 代替 r_{oi} ,则:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 土壤含盐量灰色关联度分析

根据洛惠渠灌区 1980—2003 年间 52 个观测井的水样以及相对应的土壤含盐量数据,采用灰色关联度分析方法对水盐动态进行了探讨,故对土壤含盐量与地下水矿化度和地下水埋深进行灰关联分析,利用公式(1)和(3)计算,地下水矿化度对土壤含盐量的关联度为 $r_1=0.867$,地下水埋深对土壤含盐量的关联度为 $r_2=0.783$,可见该灌区的地下水水质是影响土壤盐碱化的主要因素,而地下水埋深对盐分的转移也起着决定性作用。

2.2 土壤水盐动态变化分析

2.2.1 气候因素与水量平衡 土壤盐分变化与降雨、蒸腾蒸发密切相关,从宏观来分析,选取 1980—2003 年较为连续的 20 a 水文资料,由图 1 可明显看出,降雨量和蒸发量年际变化较大,总体来说,蒸发量远远大于降雨量。1980—1982 年、1988—1993 年两区段曲线走势趋于一致;1982—1988 年、1993—2003 年两区段曲线走势相反。这说明后者比前者更需要补充灌溉水源。蒸发量与降雨量的差值可以客观反映该灌区所需水量的趋势,因此,从图中差值曲线上取得 5 个典型峰值,即需水量较大的 5 个年份(1982, 1986, 1995, 1997 和 2000 年)进行地下水特性分析。

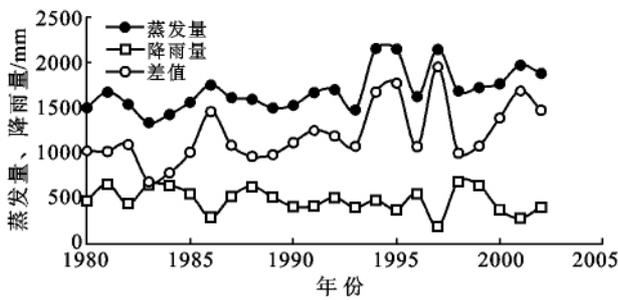


图 1 研究区降雨量、蒸发量和差值年际变化

2.2.2 地下水矿化度与土壤含盐量动态变化 矿化度是水化学成分测定的重要指标,用于评价水中总含盐量,是农田灌溉用水适用性评价的主要指标之一。地下水中的可溶盐是土壤盐分的重要来源,地下水矿化度的高低直接影响土壤的含盐量。从图 2 可以看出,3 层阶地的地下水矿化度年际变化趋势几乎一致,表明 3 层阶地的盐分补给源具有类似的变化趋势,因此分别研究各阶地情况可以代表整个灌区。其中 20 世纪 80—90 年代中期,地下水矿化度较小,在 1~3 g/L 之间,且变化不大;1997 年较特殊,由于降雨较少,蒸发强烈,地下水矿化度较高,据实测资料该年全灌区平均矿化度为 15.16 g/L;到 2000 年恢复到 1~2 g/L 之间。

在地下水矿化度较高且蒸发强烈的情况下,地下水携带下层盐分沿土壤毛细管上升,使土壤含盐量增大,因此土壤含盐量变化趋势与地下水矿化度相似。

但图 3 显示的结果正相反,1997 年相似性最差,这是由于 1997 年降雨量最小,蒸发量最大,地下水补给途径主要通过农作物的灌溉入渗,通过引水排水加速了灌区内土壤脱盐进程。在最近几年,随着气温升高,土壤蒸发量增大,干旱程度增加,由于灌区引水的数量和频率增加,从而在干旱的气候条件下,使灌区的盐碱化得到了缓解,整个灌区的土壤含盐量处于较低水平。

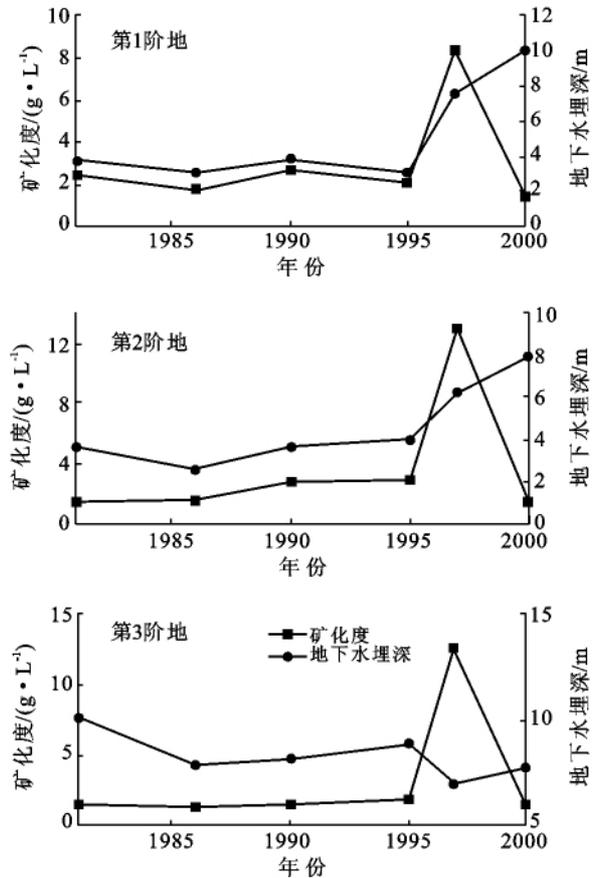


图 2 洛惠渠灌区各阶地年际矿化度动态变化

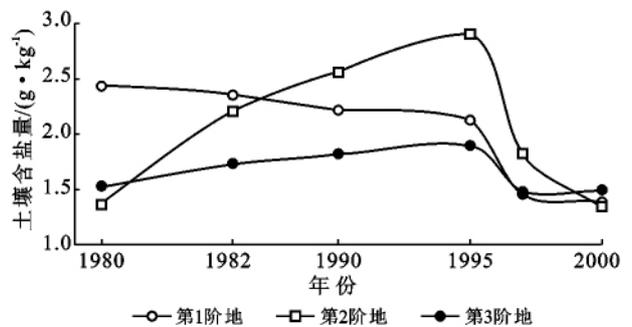


图 3 洛惠渠灌区各阶地年际土壤含盐量动态变化

2.2.3 地下水埋深与土壤含盐量动态变化 地下水埋深对气候、地形,特别是灌溉排水活动的反映非常灵敏,它对蒸发积盐,淋溶脱盐和盐分相对稳定等 3 种水盐运动形式起到一定的影响作用。而地下水埋深年际变化量对分析长期水盐动态变化及预测未来发展趋势有着重要的意义。

从图 2 看出,第 1 阶地地下水埋深逐年增加,1980—1995 年埋深基本保持不变,而降雨量和蒸发量差值逐年增大,地下水通过毛管作用不断上升至地表,水分蒸发散失,盐分则滞留于土壤表层,使土壤盐分积累量增加;1995—2000 年地下水埋深明显下降,毛管作用已无法将地下水输送到地表,土壤表层不积

盐,加上引水灌溉也起到一定的脱盐作用,此外影响含盐量的因素还与该井地理位置有关,该井位于盐池洼排水干沟附近,土壤一直处于淋洗状态,所以可以持续脱盐。第 2 阶地地下水埋深与第 1 阶地相类似,土壤含盐量也逐年减少,影响因素除地理位置以外基本与第 1 阶地相类似;第 3 阶地地下水埋深多年变化较大,但综合考虑呈现一种降低的趋势,而其土壤含盐量也将呈现一种降低的趋势,这与图 3 相符合。通过地水埋深的分析推知,整个灌区土壤含盐量可以维持在较低水平。

2.3 土壤水盐动态耦合模型研究

为了进一步阐明洛惠渠灌区土壤水盐动态规律,对 2003 年 52 个观测井的土壤含盐量、地下水矿化度和地下水埋深进行多因子非线性耦合关系模型研究。由于各个参数均为非线性变化,采用非线性模型因含指数或其它数学函数,往往不宜或无法转换为线性模型求解,因此对这类模型的参数估计,在此借助于非线性的迭代方法:Newton—Raphson 方法求解,方法通过 Matlab 编程实现。

最终构建洛惠渠灌区土壤水盐动态耦合关系非线性模型为:

$$y=1.1016D^{-0.0925}S^{0.5523}$$

式中: D ——地下水埋深; S ——地下水矿化度; y ——土壤含盐量。其模型方差分析 F 值为 1 223.6, $p=0.0001$,达极显著水平。模型确定系数 $R^2=0.9632$,最大误差为 $1.3161(10^{-3} \text{ s/m})$,平均误差 $0.3945(10^{-3} \text{ s/m})$,因此拟合效果很好,说明构建的灌区土壤水盐动态耦合关系模型模拟效果较好,整体绝对误差和相对误差均较小,在某些井点出现较大误差的原因在于模型没有考虑蒸发量、含水率、土壤类型空间差异和水土保持综合治理等下垫面因子的影响,其预测精度是可以接受的。说明建立基于地下水矿化度、地下水埋深的灌区土壤水盐耦合模型不仅可行,而且可靠。

3 结论

(1) 地下水矿化度是影响土壤含盐量的主要因素,地下水埋深对盐分的转移也起着重要的作用,各因子之间相互作用,形成了复杂的耦合关系。

(2) 该灌区处于脱盐和相对稳定状态,土壤含盐量变化趋势与地下水矿化度和地下水位变化趋势不一致;外界环境影响不可忽略,地理位置、地形地貌、当地气候条件及人为作用等因素综合作用下均能导致含盐量发生变化,破坏灌区脱盐平衡。

(3) 各因子之间也彼此相互作用,相互影响,形成了复杂条件下的耦合关系,基于地下水矿化度、地下水埋深所建立的灌区土壤水盐耦合关系模型不仅可行,而且可靠,能够很好地定量描述土壤水盐动态变化与其影响因子之间的响应关系,实现了土壤水盐动态预报。

[参 考 文 献]

- [1] Li Yi, Wang Wenyan, Wang Quanjie. On the application of drip irrigation under plastic mulch in arid and semiarid region for water saving and salt prevention[J]. Irrigation and Drainage, 2001,20(2):42-46.
- [2] Bachmann J, Horton R, Ploeg R R. Isothermal and non-isothermal evaporation from four sandy soil of different water repellency[J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 2001,65(6):1599-1607.
- [3] Fritton D D, Don Kirkham, Shaw R H. Soil water evaporation, isothermal diffusion, and heat and water transfer [J]. Soil. Sci. Soc. Am. Proc., 1970,34(2):183-189.
- [4] Mahrer Y, Naot O, Rawitz E, et al. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene[J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1984,48(2):362-367.
- [5] Shi H B, Akae Takeo, Nagahorikinzo, et al. Simulation of leaching requirement for Hetao irrigation distraction considering salt redistribution after irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(5):67-72.
- [6] Gao Jun, Huang Yuanfang, Li Baoguo. Study on field soil particles component and its spatial variability in the profile layers[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003,9(2):151-157.
- [7] 张祥伟,竹内邦良. 大区域地下水盐模拟的理论与方法[J]. 水利学报,2004,35(6):7-13.
- [8] 胡安焱,高瑾,贺屹. 干旱内陆灌区土壤水盐模型[J]. 水科学进展,2002,13(6):726-729.
- [9] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [10] 张霞,李占斌,李鹏. 洛惠渠灌区地下水动态变化规律研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(8):223-226.
- [11] 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):73-78.
- [12] 刘思峰,谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 4 版. 北京:科学出版社,2008.
- [13] 朱湖根. 有时序与非时序系统的灰色关联度分析[J]. 信息与控制,1992,21(3):177-179.