

污水灌溉风险概率分布的研究^{*}

黄鑫¹, 李洪良², 邵孝侯³, 邱林¹

(1. 华北水利水电学院 环境与市政工程学院, 河南 郑州 450008; 2. 黄河水利委员会新闻宣传出版中心, 河南 郑州 450003; 3. 河海大学 农业工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对目前我国水资源紧缺、用大量污水进行农田灌溉造成环境污染的现状, 指出了污水灌溉风险研究中的不足。利用农业干旱模型, 通过非参数检验对污水灌溉风险的概率分布进行了研究, 并利用江苏省南京地区某污灌区的实际资料, 计算了当地污水灌溉风险的概率分布。

关键词: 污水灌溉; 风险; 概率分布; 非参数检验

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)04-0017-04

0 引言

随着我国国民经济的快速发展和人民生活水平的提高, 农业灌溉用水不断被工业和城市生活用水挤占, 造成农业缺水日趋严重^[1,2]; 同时, 工业和生活污水排放量的加剧, 导致全国各大水域水质受到污染, 农业受到了水质性缺水的严重挑战。因此, 农业上不得不用大量的污水灌溉农田, 并且可以预见, 在未来相当长一段时间内, 污水灌溉面积将有增无减。

污水灌溉虽可以提供水肥资源, 但在我国, 由于污水处理能力低、污水处理费用大以及人们的环保意识薄弱, 大量未经处理或缺少必要预处理的污水用于灌溉农田^[3], 导致一些地区土壤和水源中有毒有害物质积累, 环境受到不同程度的污染, 不少污灌区居民癌症等疾病的发病率远高于非污灌区, 而且此趋势还在发展^[4]。对污水灌溉造成的危害风险已有大量的研究^[5], 然而这些研究大都是对安全允许值的定量研究, 对风险的概率分布研究很少。

一般情况下, 年降水量服从皮尔逊 P-III 型分布。本文在不考虑非污水灌溉的供水条件下对污水灌溉造成风险的概率分布进行研究探讨。由于年降水量的随机性, 使得每年农业的干旱程度是随机的, 从而造成需要用来灌溉的污水量也是随机的, 其造成的环境风险也具有同样的随机性。

本文利用农业干旱模型^[6], 由年降水量的概率分布, 得出污水灌溉环境污染风险的概率分布, 并使用非参数检验的方法确定其数字特征。

1 污水灌溉风险的概率分布及其数字特征

1.1 数学理论推导

(1) 年降水量 R 服从 P-III 分布, 使用适线法^[7]确定出总体参数

(2) 作物全生育期的水分胁迫产量损失函数的数学模型推导

全生育期作物水分生产函数的数学模型常见的为抛物线形式:

$$Y = a_0 + b_0 \cdot W + c_0 \cdot W^2, \quad (1)$$

式中: Y 为作物产量; W 为灌水量; a_0 , b_0 , c_0 为经验系数, 根据实际问题 $c_0 < 0$ 。这里函数只考虑污水灌溉对作物品质的影响, 经大量实测资料拟合而得到。

考虑到供水量为零时产量为零, 将式(1)变形为:

$$Y = b_0 \cdot W_c + c_0 \cdot W_c^2, \quad (2)$$

式中: W_c 为作物的实际供水量; 其余符号意义同上。

根据边际效益分析原理, Y_{\max} 设为充分灌溉下作物的最大产量, 此时对应的供水量为 W_N 。当 $W_c \leq W_N$ 时, $\frac{dY}{dW_c} > 0$, $\frac{d^2Y}{dW_c^2} = 2c_0 < 0$, 即 $c_0 < 0$ 。此时:

* 收稿日期: 2008-04-08

基金项目: 教育部重点科研资助项目(03171)

作者简介: 黄鑫(1982-), 女, 河南郑州人, 助教, 硕士, 主要研究方向为水资源管理与环境保护. E-mail: huangxin0013@163.com

$$D_r = \frac{Y_{\max} - Y}{Y_{\max}} = \frac{(b_0 \cdot W_N + c_0 \cdot W_N^2) - (b_0 \cdot W_C + c_0 \cdot W_C^2)}{b_0 \cdot W_N + c_0 \cdot W_N^2} = \frac{b_0(W_N - W_C) + c_0 \cdot (W_N - W_C)(W_N + W_C)}{b_0 W_N + c_0 \cdot W_N^2}。$$

令 $\frac{W_N - W_C}{W_N} = R_{\text{SWS}}$, $0 \leq R_{\text{SWS}} \leq 1$ 称为相对土壤水分

胁迫。 $W_C = W_N - W_N \cdot R_{\text{SWS}}$ 代入上式得:

$$D_r = \frac{-c_0 \cdot W_N^2 \cdot R_{\text{SWS}} + W_N(2 \cdot W_N \cdot c_0 + b_0) \cdot R_{\text{SWS}}}{b_0 \cdot W_N + c_0 \cdot W_N^2} =$$

$$-\frac{c_0 \cdot W_N^2}{b_0 \cdot W_N + c_0 \cdot W_N^2} \cdot R_{\text{SWS}}^2 + \frac{W_N(2 \cdot W_N \cdot c_0 + b_0)}{b_0 \cdot W_N + c_0 \cdot W_N^2} R_{\text{SWS}} =$$

$$A \cdot R_{\text{SWS}}^2 + B \cdot R_{\text{SWS}}。 \quad (3)$$

$D_r(R_{\text{SWS}})$ 为作物全生育期的水分胁迫产量损失函数。

$$A = -\frac{c_0 \cdot W_N^2}{b_0 \cdot W_N + c_0 \cdot W_N^2} > 0, B = \frac{W_N(2 \cdot W_N \cdot c_0 + b_0)}{b_0 \cdot W_N + c_0 \cdot W_N^2},$$

$A + B = 1$ 。当 $R_{\text{SWS}} = 0$ 时, $D_r = 0$; 当 $R_{\text{SWS}} = 1$ 时, $D_r = A + B = 1$ 。

用最小二乘法求解 b_0, c_0 得到:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i W_i \cdot \sum_{i=1}^n W_i^4 - \sum_{i=1}^n Y_i W_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n W_i^3}{\sum_{i=1}^n W_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n W_i^2 - (\sum_{i=1}^n W_i^3)^2}, \quad (4)$$

$$c_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i W_i \cdot \sum_{i=1}^n W_i^3 - \sum_{i=1}^n Y_i W_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n W_i^2}{(\sum_{i=1}^n W_i^3)^2 - \sum_{i=1}^n W_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n W_i^2}。 \quad (5)$$

$$D(R) = \begin{cases} A \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot R + G + w_0}{ET + w'}\right)^2 + B \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot R + G + w_0}{ET + w'}\right), & 0 \leq W_C \leq W_N, \\ 0, & W_C > W_N, \end{cases} \quad (9)$$

式中: $D(R)$ 为污水灌溉风险, 可知其为随机变量 R 的函数; 其余符号意义同上。

设 R 的分布密度函数为 $\phi(r)$, 则 D 的概率分布函数 $F(x)$ 为:

$$F(x) = P(D \geq x)。$$

已知当 $x > 1$ 时, $F(x) = 0$, 当 $x < 0$ 时, $F(x) = 1$ 。当 $0 \leq x \leq 1$ 时, 由 $D \geq x$ 利用公式(9)可以得出 $R \leq S(x)$ 则:

$$F(x) = P(R \leq S(x)) = \int_0^{s(x)} \phi(r) dr。$$

D 的分布密度函数 $f(x)$ 为:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \begin{cases} \phi(S(x)) \cdot \frac{dS}{dx}, & 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (10)$$

D 的期望值 $E(D)$ 为:

$$E(D) = \int_0^1 x \cdot f(x) dx。 \quad (11)$$

(3) 作物生育期内自然可供水量

$$W_C = P_0 + G + w_0 = \alpha \cdot R + G + w_0 \quad (6)$$

式中: W_C 为作物的可供水量(mm); P_0 为作物的有效降雨量(mm); α 为降雨量入渗系数, 一般认为一次降雨量 < 5 mm 时, α 为 0; 当一次降雨量在 5 ~ 50 mm 时, α 为 0.8 ~ 1.0; 当一次降雨量 > 50 mm 时, α 为 0.7 ~ 0.8; R 为年降雨量(mm); G 为作物的可补给地下水量(mm); w_0 为作物土壤的初始贮水量(mm)。 w_0 可由下面公式计算:

$$w_0 = 1\,000 \times H \times n \times \theta, \quad (7)$$

式中: H 为作物土壤计划的湿润层深(m); n 为计划湿润层内土壤的空隙率(以占土壤体积的%计); θ 为作物土壤的含水率(以占土壤空隙体积的%计)。

(4) 作物生育期内的需水量

$$W_N = ET + w', \quad (8)$$

式中: W_N 为作物的需水量(mm); ET 为作物的蒸发量(mm); w' 为作物全生育阶段期允许的最小土壤贮水量(mm), 可取田间持水率 60% ~ 80%。

(5) 模型导出

经过上述推导, 把式(8)和式(6)代入式(3)可以得到:

D 的方差 $V(D)$ 为:

$$V(D) = \int_0^1 [x - E(D)]^2 \cdot f(x) dx。 \quad (12)$$

1.2 非参数假设检验方法

W 检验是 Shapiro 与 Wilk 于 1965 年提出的, 要求样本容量 n 在 3 ~ 50 之间, 这个检验已被定为国家标准^[8]。由于 W 检验是正态性检验, 故利用这种检验方法可以检验一批观测值或随机数是否来自同一正态分布。检验问题为 H_0 : 总体服从正态分布; H_1 : 总体不服从正态分布。W 检验步骤为:

(1) 将观测值(随机数)按非降次序排列成 $X_{(1)}$

$\leq \dots \leq x_{(n)}$;

(2) 按公式

$$W = \frac{\left\{ \sum_{k=1}^{\left[\frac{n}{2}\right]} a_k(W) [X_{(n+1-k)} - X_{(k)}] \right\}^2}{\sum_{k=1}^n (X_{(k)} - \bar{X})^2}, \quad (13)$$

计算统计量 W 的值。上式中 $a_k(W)$ 可以查表得到;

(3) 对给定的显著性水平 α 和样本容量 n , 可以查表得到 W_α ;

(4) 作出判断, 若 $W < W_\alpha$, 则拒绝 H_0 , 否则不拒绝 H_0 。

利用研究地区真实的降雨系列资料, 由式(1)至式(9)计算出风险系列, 然后可利用 Shapiro - Wilk 的 W 检验对风险的样本进行非参数假设检验, 判断该地区农田污水灌溉风险是否服从正态分布。

2 算例

利用南京地区某污灌区的资料来研究污水灌溉风险的概率分布。灌区内主要作物为水稻, 根据水资源平衡分析可知, 灌溉保证率 $P = 90\%$ 时, 当地降雨径流难以满足灌区用水要求, 从而需要灌溉。由当地 10 年的气象、地质和水文等资料, 取水稻全生育期(5 月至 9 月)的相应资料, 经计算整理后的当地降水参数为 $C_v = 0.15$, $C_s = 0.30$, $\bar{X} = 1\ 359$ 。

土壤初始蓄水量为 86.4 mm; 水稻全生育期需水量取 $W_N = 600$ mm。根据已知年的灌水量和相应水稻产量得 $b_0 = 1.565\ 8$, $c_0 = -0.000\ 65$; 则 $A = 0.329$, $B = 0.671$ 。

利用当地 10 年的全生育期内的降雨系列, 可计算出 10 个污水灌溉风险程度的数据, 按由小到大排列, 结果如表 1 所示。

表 1 污水灌溉风险程度系列

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.058	0.153	0.216	0.237	0.251	0.281	0.298	0.337	0.390	0.531

对污水灌溉风险程度进行 W 检验, 为了便于计算, 列表 2 如下。

表 2 W 检验计算列表

k	$X_{(k)}$	$X_{(11-k)}$	$X_{11-k} - X_{(k)}$	$a_k(W)$	$a_k(W) [X_{(11-k)} - X_{(k)}]$
1	0.058	0.531	0.473	0.573 9	0.271 455
2	0.153	0.390	0.237	0.329 1	0.077 997
3	0.216	0.337	0.121	0.214 1	0.025 906
4	0.237	0.298	0.061	0.122 4	0.007 466
5	0.251	0.281	0.03	0.039 9	0.001 197

经计算 $W = 0.979$, 分别取显著性水平 $\alpha = 0.01$, $\alpha = 0.05$, $\alpha = 0.10$, 查表得到 $W_{0.01} = 0.781$, $W_{0.05} = 0.842$, $W_{0.1} = 0.869$, 发现 $W > W_{0.01}$, $W > W_{0.05}$, $W > W_{0.10}$, 所以接受 H_0 , 认为当地污水灌溉风险程度在 3 种显著水平下均可以看作

是服从正态分布。用最大似然估计法对它们进行参数估计, 结果为“污水灌溉风险 $\sim N(0.275, 0.015)$ ”。

3 结语

污水灌溉在我国农业发展中已成为普遍现象。人们只看到它可观的“水肥效应”, 而轻视了环境污染问题。近年来, 人们对污水灌溉带来的环境污染风险越来越重视, 并进行了大量研究, 也取得了不少成果, 如基于统计经验方法的描述性盐分模拟模块、费用 - 效益风险评估方法、膳食砷暴露模型等。但是这些研究污水灌溉风险的方法没有较深刻的定量分析污水灌溉后环境风险程度, 只是在自己的领域进行着单方面的纵向研究, 对污水灌溉造成的各类风险的严重程度研究较少, 更未能对污水灌溉的概率分布进行研究探讨。

本文针对以上不足, 应用非参数检验的方法, 对污水灌溉风险的概率分布进行了研究探讨, 最后利用江苏省南京地区某污灌区的实际数据进行计算, 得出了当地污水灌溉风险的概率分布。

本文使用的 W 检验只能检验数据是否服从正态分布, 当数据不能视作服从正态分布时, 就不能判断其服从何种分布。另外, 当数据可以看成正态分布时, 其也可能可以被看作服从另一种常见分布, 如分布等。此时应加以比较, 判断更适合服从的分布类型, 对这一问题还有待于今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 章功. 我们处在水荒时代[J]. 时代潮, 2004, (14): 14 - 17.
- [2] 仇付国, 王晓昌. 污水再生利用的健康风险评估方法[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(1): 49 - 51.
- [3] 邵孝侯. 农业环境学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2005: 76 - 130.
- [4] 赵肖, 周培疆. 污水灌溉土壤中 As 暴露的健康风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 926 - 929.
- [5] 李洪良, 邵孝侯, 黄鑫, 等. 农田污水灌溉的危害研究进展与解决对策[J]. 节水灌溉, 2007, (2): 14 - 17.
- [6] 陈晓楠. 农业干旱风险分析及对策[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2005.
- [7] 任树梅, 朱仲元, 张文萍, 等. 工程水文学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 83 - 99.
- [8] 吴翊, 李永乐, 胡庆军. 应用数理统计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995: 123 - 127.

Study on Probability Distribution of Sewage Irrigation Risks

Huang Xin¹, Li Hongliang², Shao Xiaohou³ and Qiu Lin¹

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,

Institute of Environmental and Municipal Engineering, Zhengzhou 450008, China;

2. Yellow River Conservancy Commission, Press and Publication Center, Zhengzhou 450003, China;

3. Hohai University, Institute of Agricultural Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the light of the present status of water resources shortage in China and environmental pollution caused by using a lot of sewage to irrigate cropland, the paper points out the shortage existing in the research on sewage irrigation risks. Based on the model of agricultural drought, the probability distribution of sewage irrigation risks is studied with nonparametric test, and the probability distribution of local sewage irrigation risks is calculated by using the actual data of sewage irrigation area of Nanjing city, Jiangsu province.

Key words: sewage irrigation; risk; probability distribution; nonparametric test

.....
(上接第 16 页)

Anomaly Intensity of Fault Deformation and Earthquakes in the North China

Guo Liangqian

(First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract: The observed data from across-fault short-leveling surveys in the North China are processed and the activity velocities of faults are calculated. On this basis, the anomaly intensity of fault deformation is derived. Then by comparative study on the temporal-spatial variation of anomaly intensity and the development and occurrences of moderate and strong earthquakes in this area, it is found that intensive anomalies did appear before Datong, Zhangbei and Wen'an earthquakes. Generally, intensive anomaly of fault deformation appears in a period of about one year before moderate and strong earthquakes, which can be considered as a medium-term seismic precursor. Most of the moderate and strong earthquakes occur in or after the year with enhancing anomaly intensity.

Key words: fault deformation; anomaly intensity; precursory index; earthquake