

造纸废水灌溉对芦苇生长和土壤质量的影响及综合评价

惠淑荣¹ 索婉星² 李丽锋^{1*} 杜哲鑫²

(1. 沈阳农业大学 理学院, 沈阳 110161;

2. 沈阳农业大学 生物科学技术学院, 沈阳 110161)

摘要 为全面客观评价废水灌溉对辽宁双台河口湿地的影响,通过构建小试装置模拟盘锦双台河口湿地,分析造纸废水灌溉条件下芦苇不同生长期湿地各指标变化规律,采用粗糙集理论综合评价造纸废水灌溉对芦苇湿地影响。结果表明,造纸废水灌溉提高了芦苇植株茎粗、株高、叶面积及生物量,芦苇各生长指标与废水灌溉浓度正相关,不同灌溉浓度各指标值间存在显著差异;废水灌溉后,土壤中有机质、TN、TP含量随着灌溉浓度的增大而增加,但各灌溉浓度间差异不显著;废水灌溉后土壤中重金属含量均显著增加,且废水浓度越大,土壤中重金属含量越多。利用粗糙集方法对不同造纸废水浓度灌溉下的芦苇湿地影响程度做综合评分,灌溉浓度300 mg/L的综合得分为0.8026;175、50 mg/L的综合得分分别为0.6941、0.6813;0 mg/L的综合得分为0.4013,即现有灌溉条件下,废水浓度越大,对芦苇湿地的影响综合评分越高,虽然会造成更多重金属累积,但总体上仍更有利于芦苇的生长与发育。

关键词 湿地;造纸废水;芦苇;粗糙集

中图分类号 X 171.1

文章编号 1007-4333(2016)11-0093-09

文献标志码 A

Effect and comprehensive evaluation of papermaking wastewater irrigation reed growing and soil quality

HUI Shu-rong¹, SUO Wan-xing², LI Li-feng^{1*}, DU Zhe-xin²

(1. College of Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. College of Biological Science and Technology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract In order to evaluate the effect of papermaking wastewater irrigation in Shuangtaihekou Wetland comprehensively and objectively, we simulated Shuangtaihekou Wetland by building experimental device schemes. to analysis The changes of reed growth indexes caused by wastewater irrigating at various growth period. Meanwhile, the Rough Set method, was adopted to evaluate the effect of reed wetland by papermaking wastewater irrigating. The results showed that the concentration of papermaking wastewater for irrigation was positively correlated with the reeds growth indexes, soil nutrient content and soil heavy metal contents. Each reed growth index, including reed plant stem diameter, plant height, leaf area and biomass, displayed significant difference under different concentrations of wastewater for irrigation. However, soil nutrients content such as organic matter, TN, and TP, showed no significant difference with the change of the concentration of. And the heavy metal content of the soil was changed significantly with the change of wastewater concentration. Composite score was made for the impact on reed wetlands at different concentrations of papermaking wastewater for irrigation by Rough Set method. When the concentration of irrigation water was 300, 150, 50 and 0 mg/L, they scored 0.8026, 0.6941, 0.6813 and 0.4013, respectively. In conclusion, under the

收稿日期: 2015-12-11

基金项目: 辽宁省自然科学基金面上项目(201602660); 国家自然科学基金(31470710); 国家自然科学基金青年基金(31100517); 辽宁省重大科技计划(2012212001); 辽宁省优秀人才支持计划(LJQ2011070)

第一作者: 惠淑荣, 教授, 主要从事应用数学方面研究, E-mail: hsrliuhui@sina.com

通讯作者: 李丽锋, 副教授, 主要从事生物数学方面研究, E-mail: xiuyue_li@163.com

current irrigation status, the greater the concentration of waste water, the higher the composite score. Therefore, despite the accumulation of heavy metals in the soil, the papermaking wastewater irrigation remains favorable in general for the growth and development of reed.

Keywords wetland; papermaking wastewater; reed; rough set

辽宁双台河口湿地水资源短缺问题突出, 平均每年调水量 16 200 万 m^3 ^[1]。位于湿地内部的造纸厂废水排放量大, 且大多沿河分布, 年排放量约 6.1 亿 t ^[2], 是潜在的灌溉水源。造纸废水灌溉湿地对缓解水资源短缺、促进植物生长、改良土壤环境具有重要意义。但由于造纸废水中所含重金属也会造成土壤中的重金属累积, 因此综合评价造纸废水灌溉对双台河口芦苇湿地影响客观地将促进和抑制两方面因素综合起来进行评价统一, 以辅助相关部门制定适宜的灌溉规划, 实现更完善的可持续发展。

废水灌溉既可促进植物生长, 提高土壤养分含量, 又会带来重金属污染。Fesanan 等^[3]建立了废水灌溉花椰菜和红球甘蓝试验模型, 研究了废水灌溉对土壤营养元素和植物质量的影响, 发现未经处理的废水适用于短期农业灌溉, 处理的废水可用于长期可持续的农业灌溉。夏江宝等^[4]设置了废水灌溉的不同灌溉次数, 探讨了芦苇株高、生物量等生长指标的变化趋势, 表明随着废水灌溉次数的增加, 芦苇各生长指标显著增加。严金龙等利用了大田试验和实验室盆栽试验, 研究造纸废水长期污灌下土壤有机质的动态变化规律, 确定了造纸废水污灌下土壤有机质显著增加^[5]。徐冰^[6]通过田间小区实验研究了不同灌水量对土壤中重金属累积的影响, 发现重金属累积量与灌水量呈一定正相关性。李丽锋

等^[7]基于重金属残留模型对废水灌溉下土壤重金属累积进行预测和评估, 探讨了芦苇湿地土壤重金属的累积规律。上述研究多集中于废水灌溉下植物生长指标和土壤营养元素单方面变化, 或偏重于重金属累积规律研究, 而对废水灌溉对湿地整体影响评价研究较少。本研究通过构建模拟天然湿地的小试装置模拟盘锦双台河口湿地, 分析不同废水灌溉浓度对芦苇湿地植物生长、土壤中 TN、TP、有机质等养分及主要重金属含量影响, 利用粗糙集方法确定评价指标权重、识别评估数据间关系的特点, 将多方面指标综合评分, 评价造纸废水灌溉对芦苇湿地整体上的影响, 旨在为合理利用造纸废水提供理论依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 设置

试验于 2014 年沈阳农业大学综合试验基地内进行。在基地平坦处砌筑 25 个大小相等的混凝土试验池作为模拟天然湿地的小试装置(图 1)。试验池的尺寸为长 \times 宽 = 2.0 m \times 1.0 m, 基础埋深 0.8 m, 高 0.9 m, 内部深度 0.8 m, 试验池底部用从双台河口湿地取土垫高约 0.2 m, 再将湿地取回的芦苇根进行移栽, 每个试验池平均栽植 1 250 株, 移栽株距 \times 行距为 0.04 m \times 0.04 m, 苇根移栽完毕后, 在其上部覆厚度约为 0.1 m 的湿地土壤。

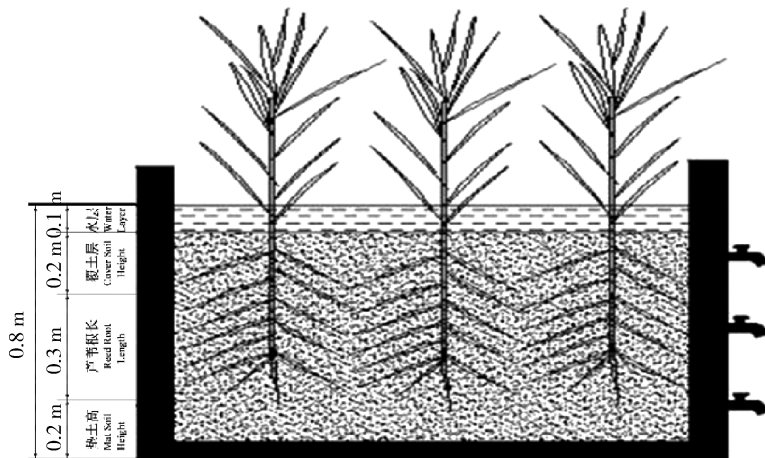


图 1 小试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

1.2 材料

供试土壤取自盘锦湿地内的自然状态下的土壤,芦苇采自辽宁省盘锦市双台河口国家级自然保护区核心区,品种为辽滨苇、盘锦苇、小紫散穗等当地品种天然混栽,运回沈阳农业大学综合试验场内,移栽至试验池中。

供试废水取自辽宁省金城造纸厂排污口。每个灌溉期前一周取供试废水 14 桶,每桶 50 L,运回沈阳农业大学综合试验场内,置于阴凉处备用。经测定,供试废水的主要成分见表 1。

表 1 灌溉废水主要成分含量

Table 1 The main components of irrigation water mg/L

指标名称 Index	指标值 Index value
CODcr	300.00
TN	29.50
TP	3.28
As	0.26
Pb	1.36
Ni	0.45
Cd	0.03
Li	4.05

具体灌溉造纸废水方式如下:将造纸废水用清水配成 3 个 CODcr 质量浓度梯度:300、175 和 50 mg/L,编号为 C_1 、 C_2 、 C_3 ,设置 1 个只灌清水的试验池进行对照,编号为 C_k 。按全国《灌溉试验规范》中划分作物生育阶段的标准,将芦苇整个生长季划分为发芽、展叶、快速生长、抽穗、成熟 5 个生长期,分别于 5 个时期灌入废水。每个试验池的灌水深度为 10 cm,计 0.2 m³,平时补充清水,保持水面 10 cm,以保证芦苇正常生长。

1.3 样品采集

在每次灌水前一天取植物样及土壤。每个池子里选取 5 株长势平均的芦苇,量测法测定株高、茎粗、叶面积。对成熟期后的芦苇进行收割,测定每个试验池芦苇的地上生物量。

土壤样品采集参考《土壤农化分析》进行,采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质;半微量蒸馏法测定土壤总氮(TN);钼锑抗比色法测定土壤总磷

(TP);等离子发射光谱法测定土壤各重金属离子含量(经测定,回收率为 90%~105%)。

1.4 粗糙集方法

1)信息系统。四元组 $S=(U,A,V,f)$ 是一个信息系统,其中 $U:U=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$ 为对象的非空有限集合,称为论域; A :属性的非空有限集合, $A=C\cup D$; $C=\{c_i|c_i\in C\}$ 称为条件属性集,每个 $c_i\in C(1\leq i\leq m)$ 称为 C 的一个简单属性; $D=\{d|d\in D\}$ 称为决策属性集,且 $C\cap D=\phi,C\neq\phi,D\neq\phi$; $V:V=\cup V_c,V_c$ 是属性 c 的值域; $c\in A$; $f:f=\{f_j|f_j:U\rightarrow V_j(1\leq j\leq m)\}$ 表示 S 的信息函数, f_j 为属性 c_i 的信息函数。

2)数据归一化及离散化处理。由于本研究所探讨内容均为定量指标,故采用式(1)和(2)进行无量纲化及标准化处理,将各项含量指标统一规范化为隶属于 $[0,1]$ 区间内的极大型指标。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min}{\max - \min} \quad (1)$$

$$y_{ij} = \frac{\max - x_{ij}}{\max - \min} \quad (2)$$

将各指标定义为条件属性,各指标的单位综合数值定义为决策属性,即条件属性集合为 $M=\{m_1,m_2,\dots,m_{12}\}$,决策属性集合为 $D=\{D_1,D_2,D_3,G\}$,论域为 $U=\{C_1,C_2,C_3,C_k\}^{[8]}$ 。根据数据五等分其范围区间为 $[0,0.2)$, $[0.2,0.4)$, $[0.4,0.6)$, $[0.6,0.8)$, $[0.8,1.0)$,将区间代码用 1,2,3,4,5 表示,一一对应,即为条件属性的离散化。

3)属性约简。根据粗糙集理论,属性约简是保持决策属性与条件属性集合之间的一致性不减少,或者等价地说保持不一致性不增加的条件属性集合的极小子集。确定条件属性的重要性即找到最大程度影响决策属性的条件属性,因此删除一个属性后,若知识系统的分类能力变化越大,则说明该属性重要性越大,反之亦然^[9]。

4)属性重要度。条件属性的信息熵:

$$H(m_i) = - \sum_{i=1}^n P(C_i) \log P(C_i) \quad (3)$$

条件属性的条件熵:

$$H(D | m_i) = - \sum_{i=1}^n P(C_i) \sum_{j=1}^m P(G_j/C_i) \log P(G_j/C_i) \quad (4)$$

属性重要度计算:

$$SGF(m_i, D) = H(m_i) - H(D/m_i) \quad (5)$$

则各指标的总权重,即总权重=一级指标权重 \times 二级指标权重,即 $G_j = P(D_i) \times P(m_j)$

1.5 综合评价模型

由于废水灌溉芦苇湿地,既有正面影响,如促进植物生长(D_1)、增加土壤养分含量(D_2),又有负面影响,如土壤中重金属(D_3)的残留问题,这些因素单位不同,具有不精确、不确定与不完全数据的特点,因此,参考国内国际相关研究成果^[10-12],根据粗糙集理论综合评价废水灌溉的影响,从而提高评价的准确性与客观性。本研究选取了植物生长类、土壤养分类、重金属类作为废水灌溉对芦苇湿地影响评价因素。根据粗糙集理论及试验数据,构建出芦苇湿地评价指标体系:以茎粗(m_1)、株高(m_2)、叶面积(m_3)、生物量(m_4)表征植物生长类(D_1);以有机质(m_5)、TN(m_6)、TP(m_7)表征土壤养分类(D_2);以砷 As(m_8)、镉 Cd(m_9)、铅 Pb(m_{10})、锂 Li(m_{11})、镍 Ni(m_{12})表征重金属类(D_3)。

2 结果与分析

2.1 废水灌溉对芦苇生长影响

研究表明(图2)造纸废水灌溉总体上促进了芦

苇的生长,茎粗、株高、叶面积及生物量随着废水灌溉浓度的增加而增大。茎粗方面,芦苇成熟期灌溉废水浓度为175 mg/L时,茎粗均值最小,而在芦苇全生长期灌溉废水浓度为300 mg/L时,茎粗均值最大。株高方面,除成熟期灌溉废水外,其他灌溉方式的芦苇株高均值均大于清水灌溉组(C_k),对应的灌溉方式为全生长期灌入 COD_{Cr} 浓度为300 mg/L的废水。叶面积方面,随着废水浓度的不断提高,芦苇叶面积总体上呈递增趋势,但不同灌溉方式增大幅度不同。生物量方面,在不同灌溉期内,芦苇的地上生物总量随废水浓度的升高而增大,对应灌溉期为全生长期。芦苇各生长指标均随废水浓度的增加而增大,其中生物量增加最为明显,对于 C_1 、 C_2 、 C_3 3个灌溉浓度,生物量分别较 C_k 增加了75.76%、60.10%、48.48%,叶面积次之,分别较 C_k 增加了46.99%、31.32%、18.54%,株高增加最少,分别较 C_k 增加了11.24%、9.06%、5.60%,这说明废水灌溉主要影响叶面积增加,提高光合速率,促进了芦苇生物量生长。在茎粗方面,不同灌溉期、不同灌溉浓度对茎粗的作用效果不同。对同一灌溉浓度,灌溉期对茎粗均值的作用效果从大到小顺序为:

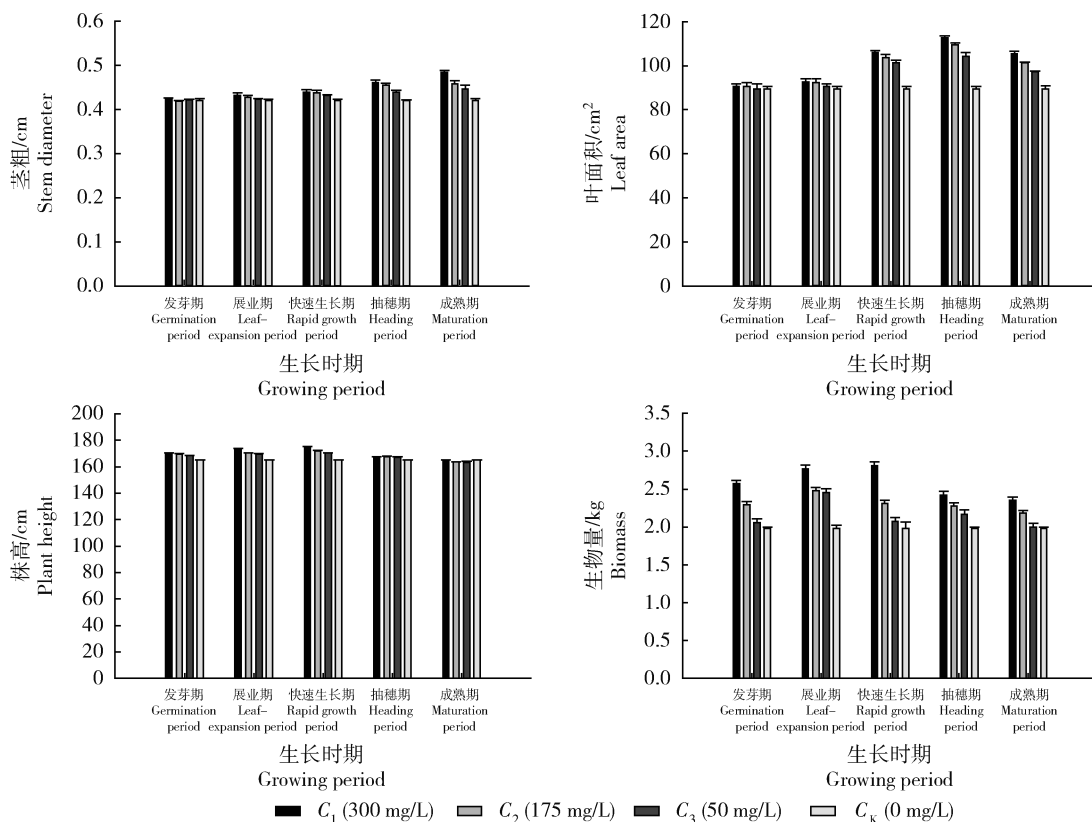


图2 废水灌溉后芦苇生长指标随生长期的变化

Fig. 2 Changes of the growing indexes of reed at different growth periods after irrigating wastewater

快速生长期>展叶期>发芽期>抽穗期>成熟期。对同一灌溉期,茎粗随废水浓度的增加而增大,即: $C_1 > C_2 > C_3 > C_k$ 。在不同灌溉浓度条件下,茎粗各指标值间差异较显著($F=12.699, P<0.01$),株高各指标值间差异较显著($F=10.612, P<0.01$),叶面积差异显著($F=5.160, P<0.05$),生物量差异极显著($F=35.230, P<0.001$)。

2.2 废水灌溉对土壤养分物质影响

由图 3 可以看出,经过废水灌溉后,湿地土壤 TN 和 TP 含量均随着灌溉浓度的增加而增大,但

差异不显著($P<0.05$)。有机质含量增加最多, C_1 、 C_2 、 C_3 的有机质含量分别为 2.22%、1.95%、1.99%,是对照组 C_k 的 1.38、1.21、1.24 倍。有研究表明,废水灌溉后,芦苇凋落物及腐烂根系较多,降解的腐殖质贮存于土壤中使土壤疏松肥沃^[4]。但本研究所得结果对此方面表现却并不明显。这种变化的原因主要有两方面,一方面与植物对养分的吸收有关,从养分季节变化规律可以看出,土壤 TN 和 TP 均在 6 月份(快速生长期)后降低,双台河口湿地土壤较贫瘠,灌溉废水中营养元素主要用于植物生长,因此土壤中养分累积量较少;而另一方面有机质易受温度影响,在温度较高的 8 月份(抽穗期)含量较高,10 月份(成熟期)则含量降低。

2.3 废水灌溉对土壤重金属含量的影响

由图 4 可见,废水灌溉后土壤中重金属的含量均显著增加,废水浓度越大,土壤中重金属含量越多。同时,Cd、Li、Ni 都随着生长期的推移表现出逐渐递增的趋势,累积量逐步增加,As 和 Pb 在抽穗期至成熟期,重金属累计均呈现出下降或增长放缓的趋势,说明此期间芦苇对其吸收加快,吸收率变大。Pb 和 Li 总体上含量较高,芦苇对 Pb 和 Li 吸收率较低,且废水中含量高,致使土壤中残留率较高;As 和 Ni 的含量较 Pb 和 Li 有所减少,废水中含量较多,但芦苇对其吸收较多,故各浓度的土壤残留并不显著;Cd 在土壤中的含量最少,且土壤中残留率最低;Pb 和 Cd 是重金属污染的主要元素,其致毒性强,残留危害大。

2.4 废水灌溉对芦苇湿地影响综合评价

根据 1.5 中评价指标体系,得到表 2 所示数据。

由表 2 中数据,结合文献[15]中综合评价方程,得出表 4。

由表 4 可知, C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_k 灌溉浓度对应综合评分分别为 0.802 6、0.694 1、0.681 3 和 0.401 3,其中 C_1 的综合评分最高,说明在一定灌溉浓度范围内, C_1 浓度灌溉芦苇湿地表现最佳, C_k 最差。其中,植物生长方面, C_1 浓度对植物生长作用最大(0.501 6), C_k 最小(0);而对于土壤养分方面,同样可以看出,在 C_1 浓度下,土壤中所含养分最多(0.301 0),而 C_k 最少(0);重金属类中, C_1 浓度下重金属含量最大,评分最低(0),最不利于芦苇湿地,故而 C_k 浓度得分最高(0.401 3)。 C_1 浓度灌溉下,相较于土壤养分(0.301 0)和重金属方面(0),植物生长类指标表现更好(0.501 6),由于 C_1 重金属含量

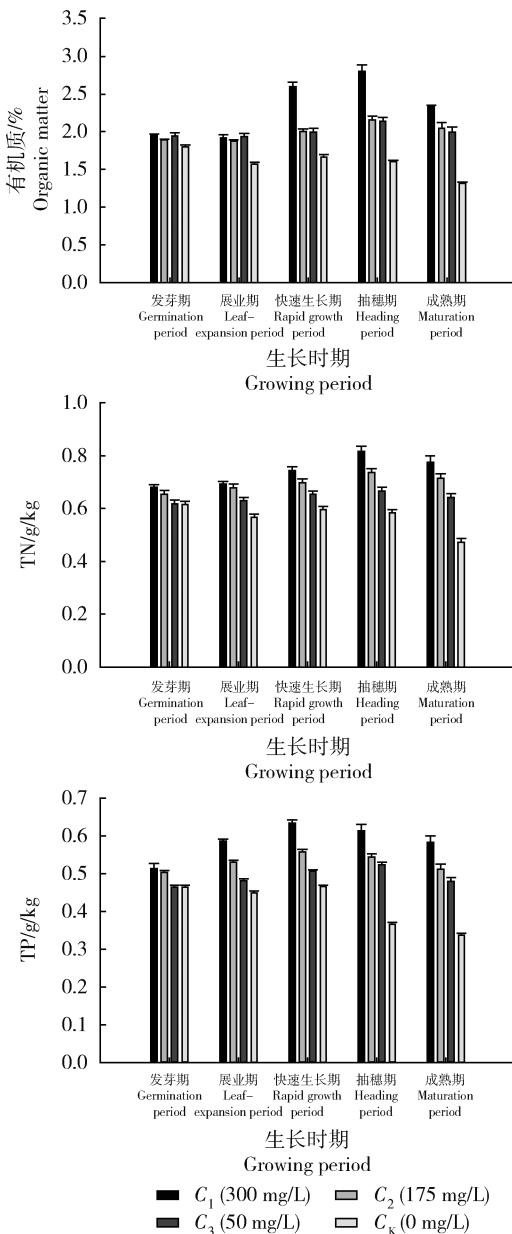


图 3 废水灌溉后土壤养分随生长期的变化

Fig. 3 Nutrient of soil changed at different growth periods after irrigating wastewater

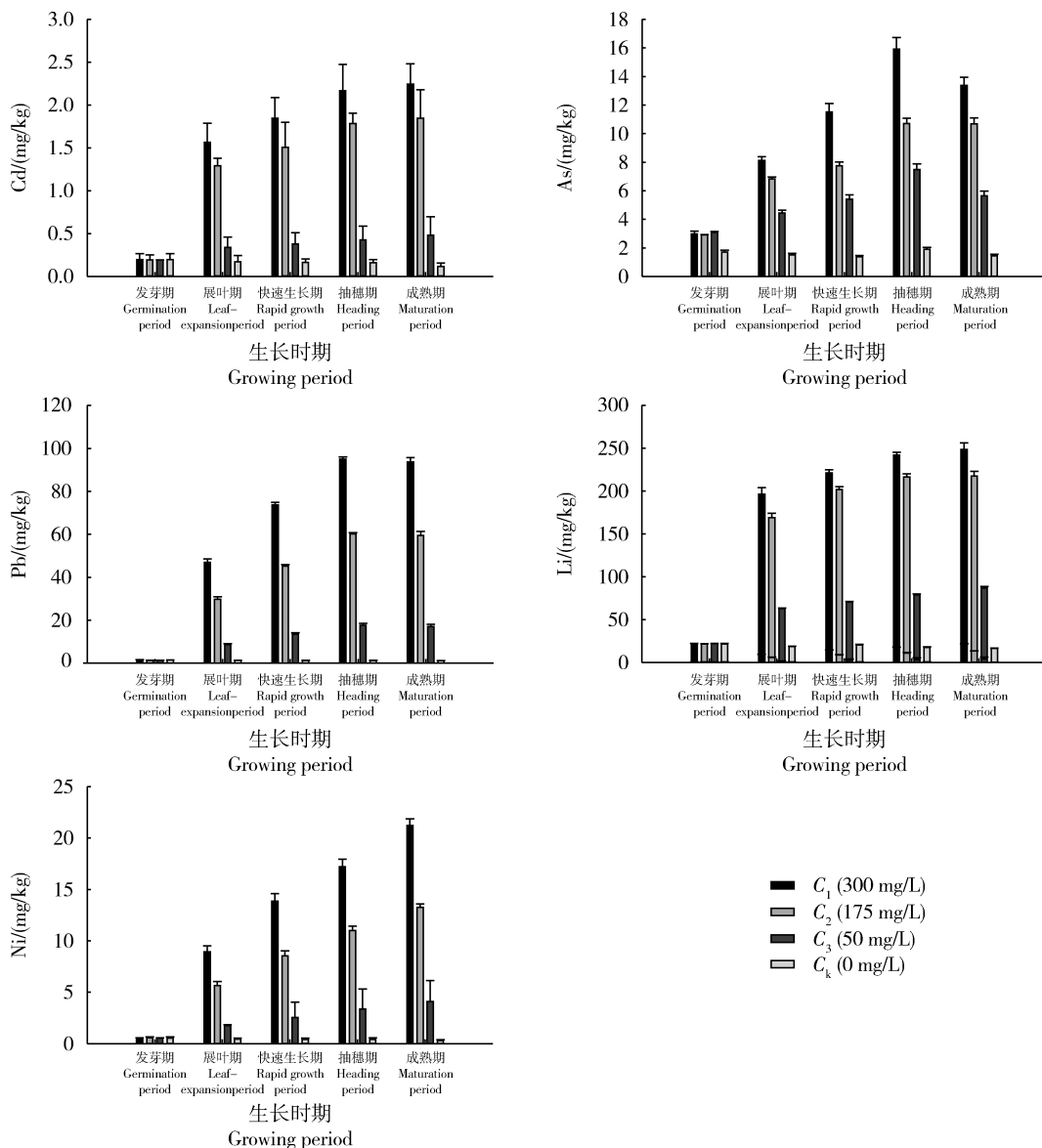


图 4 废水灌溉后土壤重金属含量随生长期的变化

Fig. 4 Changes in the content of heavy metal in soil at different growth periods after irrigating wastewater

表 2 芦苇湿地评价指标值

Table 2 The reed wetland evaluation indexes data

浓度 Concentration	植物生长类 D ₁ Reed growing class D ₁				土壤养分类 D ₂ Soil nutrient of class D ₂			重金属类 D ₃ Heavymetal class D ₃				
	m ₁ /cm	m ₂ /cm	m ₃ /cm ²	m ₄ /kg	m ₅ /%	m ₆ / (g/kg)	m ₇ / (g/kg)	m ₈ / (g/kg)	m ₉ / (mg/kg)	m ₁₀ / (mg/kg)	m ₁₁ / (mg/kg)	m ₁₂ / (mg/kg)
C ₁	0.51	183.55	131.42	3.48	2.22	0.73	0.57	10.38	1.60	62.17	185.89	12.36
C ₂	0.50	179.95	117.41	3.17	1.95	0.69	0.52	7.77	1.32	39.20	165.18	7.81
C ₃	0.48	174.24	105.99	2.94	1.99	0.64	0.49	5.22	0.36	11.57	64.05	2.46
C _k	0.42	165.00	89.41	1.98	1.61	0.57	0.42	1.59	0.16	1.31	18.84	0.42

表 3 评价指标权重

Table 3 The table of indexes weight

目标层 Target zone	一级指标权重 $P(D_i)$ First-degree weight $P(D_i)$	二级指标权重 $P(m_j)$ Second-degree weight $P(m_j)$	总体权重 (G_j) Weight (G_j)
芦苇湿地综合评价	植物生长类 D_1 0.333 3	茎粗 m_1 0.301 0	0.100 3
		株高 m_2 0.301 0	0.100 3
		叶面积 m_3 0.602 1	0.200 7
		生物量 m_4 0.301 0	0.100 3
	土壤养分类 D_2 0.333 3	有机质 m_5 0.301 0	0.100 3
		TN m_6 0.602 1	0.200 7
		TP m_7	—
	重金属类 D_3 0.333 3	砷 As m_8 0.602 1	0.200 7
		镉 Cd m_9 0	0
		铅 Pb m_{10} 0.301 0	0.100 3
		锂 Li m_{11} 0.301 0	0.100 3
		镍 Ni m_{12}	—

表 4 基于粗糙集方法的综合评价

Table 4 Synthetical evaluation by the Rough Set method

T	植物生长类 D_1 Reedgrowing class D_1	土壤养分类 D_2 Soilnutrient class D_2	重金属类 D_3 Heavy metal class D_3	D
C_1	0.501 6	0.301 0	0	0.802 6
C_2	0.382 3	0.201 9	0.109 9	0.694 1
C_3	0.260 6	0.146 3	0.287 4	0.681 3
C_k	0	0	0.401 3	0.401 3

最多,最不利于芦苇湿地,故其重金属方面得分最低(0),相较于其他灌溉浓度, C_1 浓度在植物生长(0.501 6)及土壤养分(0.301 0)方面表现最佳,故综合评分最高; C_2 浓度灌溉下,同 C_1 表现一致,强调了植物生长类(0.382 3)和土壤养分类(0.201 9)指标,弱化了重金属类指标(0.109 9); C_3 浓度灌溉下,综合评分与 C_2 差距很小,但其重金属类指标得分最高(0.287 4),比植物生长类指标高出10.28%,比土壤养分类得分高出96.45%;而对照组 C_k 在植物生长和土壤养分类中均无较好表现,因其重金属含量最少,故其重金属类指标得分最高(0.401 3)。

3 结论与讨论

1)造纸废水灌溉促进了芦苇植株茎粗、株高、叶

面积及生物量的增加,芦苇各生长指标与废水灌溉浓度具有相关性,不同灌溉期间、不同灌溉浓度,各指标值存在显著性差异;废水灌溉后土壤有机质、TN、TP含量较灌前有所提高,与废水灌溉浓度相关,均随着浓度的增加而增加,有机质较TN、TP表现得更为显著;废水灌溉后土壤中重金属的含量均显著增加,废水浓度越大,土壤中重金属含量越多,土壤中各重金属含量随芦苇生长期的变化规律不同,Cd、Li、Ni的累积量都随着生长期而逐步增加,芦苇在抽穗期至成熟期对As和Pb吸收加快,废水灌溉后土壤中重金属含量由多到少为:Li>Pb>Ni>As>Cd。

2)构建芦苇湿地评价指标体系,基于粗糙集理论确定各指标权重、识别评估数据间关系的特点进

行属性约简,计算各废水浓度下芦苇湿地的综合评分,灌溉浓度 C_1 的综合得分最高为 0.802 6, C_2 、 C_3 的综合得分较接近分别为 0.694 1、0.681 3, C_k 的综合得分最低为 0.401 3,在现有灌溉浓度范围内,浓度越高,综合评分越高,对芦苇湿地的促进作用越大。

3) 芦苇湿地综合评价体系不仅可以更加客观地评价造纸废水灌溉芦苇湿地的规划模式,而且有助于双台河口湿地造纸废水灌溉的合理有效利用,对湿地保护的可持续发展具有重要的指导意义。本研究针对造纸废水灌溉芦苇湿地这一情况,构建模拟天然湿地的小试装置,构建了芦苇湿地综合评价体系,基于粗糙集方法对整个芦苇湿地综合体系进行权重确定及评分,客观直接地得出了各指标的综合评价分值。在研究中发现,芦苇快速生长期后,土壤中养分会明显减少,这是由于此时双台河口湿地土壤较贫瘠,废水灌溉中营养元素主要用于植物生长,因此土壤中养分累积量较少,且有机质易受温度影响,在温度较高的 8 月份(抽穗期)含量较高,10 月份(成熟期)则含量降低。另一方面,浓度越大对于芦苇湿地促进作用越大,但意味着会造成更多的重金属累积,如何减少重金属累积、确定灌溉浓度范围以及一级分类权重的确立,建立更完善的可持续灌溉体系有待于进一步的研究与更加深入的探讨。

参 考 文 献

- [1] 苏芳莉,陈佳琦,李春云,吴新梅,卢佳,王铁良. 湿地土壤及芦苇对造纸废水灌溉的响应[J]. 环境科学与技术, 2014(8):132-137
Su F L, Chen J Q, Li C Y, Wu X M, Lu J, Wang T L. The irrigation of wetland soil and reed by papermaking wastewater [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014(8):132-137
- [2] 辛琨. 生态系统服务功能价值估算[D]. 沈阳:中国科学院研究生院(沈阳应用生态研究所), 2001
Xin K. The value estimation of ecosystem service function[D]. Shenyang: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Applied Ecology), 2001
- [3] Kiziloglu F M, Turan M, Sahin U, Kuslu Y, Dursun A. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L var *botrytis*) and red cabbage (*Brassica oleracea* L var *rubra*) grown on calcareous soil in Turkey [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6):716-724
- [4] 夏江宝,谢文军,孙景宽,刘京涛,刘擎,陆兆华. 造纸废水灌溉对芦苇生长及其土壤改良效应[J]. 水土保持学报, 2011(1):110-113,118
Xia J B, Xie W J, Sun J K, Liu J T, Liu Q, Lu Z H. The improvement of soil and the growth of reed by papermaking wastewater [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011(1):110-113,118
- [5] 严金龙,全桂香,丁成. 造纸废水灌溉对土壤性质及脲酶活性的影响[J]. 中国造纸学报, 2008(4):58-60
Yan J L, Quan G X, Ding C. Paper effluent wastewater irrigation on soil properties and the effects of urease activity [J]. *Transactions of China Pulpa and Paper*, 2008(4):58-60
- [6] 徐冰. 污水灌溉条件下重金属分布规律的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2004
Xu B. Research on the laws of the distribution of heavy metals wastewater irrigation condition [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2004
- [7] 李丽锋,苏芳莉,关驰,郭楚楠. 造纸废水灌溉对湿地土壤重金属影响及趋势评价[J]. 环境科学学报, 2015(9):2964-2970
Li L F, Su F L, Guan C, Guo C N. The effect and evaluation of the trend to the heavy metals in wetland soil by Papermaking wastewater irrigation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015(9):2964-2970
- [8] 刘宏杰,冯博琴,李文捷,吕焕通. 粗糙集属性约简判别分析方法及其应用[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(8):939-943
Liu H J, Feng B Q, Li W J, Lv H T. The rough set attribute reduction discriminant analysis method and its application [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(8):939-943
- [9] 吕勇,孙谦,张超家. 基于粗糙集的湿地景观质量评价研究—以重庆阿蓬江国家湿地公园为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(7):12-18
Lv Y, Sun Q, Zhang C J. Study on evaluation of wetland landscape quality based on rough set [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(7):12-18
- [10] 陈德刚. 模糊粗糙集理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2013:19-69
Chen D G. *The Fuzzy Rough Set Theory and Method* [M]. Beijing: Science Press, 2013
- [11] Ziarko W. Special issue on Rough Set and knowledge discovery [J]. *International Journal of Computational Intelligence*, 1995, 11:2-4
- [12] 王国胤,姚一豫,于洪. 粗糙集理论与应用研究综述[J]. 计算机学报, 2009(7):1229-1246
Wang G Y, Yao Y Y, Yu H. Theory and application summarizing of Rough Set [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2009(7):1229-1246
- [13] 丁成,王世和,杨春生. 草浆废水灌溉对海涂湿地土壤及芦苇生长的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(1):21-25
Ding C, Wang S H, Yang C S. Straw pulp wastewater irrigation on the tidal flat wetland soil and reed growth [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(1):21-25
- [14] 李杰霞,杨志敏,陈庆华. 重庆市农业面源污染负荷的空间分布

- 特征研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(7): 145-151
- Li J X, Yang Z M, Chen Q H. The study of agricultural non-point source pollution load spatial distribution characteristics in Chongqing [J]. *Journal of Southwest University: Natural Science*, 2008, 30(7): 145-151
- [15] 翟治芬, 王兰英, 孙敏章, 严昌荣, 梁瑜珊. 基于 AHP 与 Rough Set 的农业节水技术综合评价[J]. 生态学报, 2012(3): 931-941
- Zhai Z F, Wang Y L, Sun M Z, Yan C R, Liang Y S. Comprehensive evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP and Rough Set method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012(3): 931-941
- [16] 苗夺谦, 王珏. 粗糙集理论中知识粗糙性与信息熵关系的讨论[J]. 模式识别与人工智能, 1998, 11(1): 34-40
- Miao D Q, Wang J. On the relationships between information entropy and roughness of knowledge in Roughset theory [J]. *Pattern recognition and artificial intelligence*, 1998, 11(1): 34-40
- [17] Dendine M A, Rollland T, Tremolieres. Effect of ammonium ions on the net photosynthesis of three species of Elodea [J]. *Aquatic Botany*, 1993, 46: 301-315
- [18] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 祝万鹏, 向长生. 石家庄滨湖人工湿地去除农业径流中 COD 效果的测试与分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 192-196
- Lu S Y, Zhang P Y, Yu G, Zhu W P, Xiang C S. Wangjiazhuang lake artificial wetland test and analysis of the effect by removing COD in agricultural runoff [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(1): 192-196
- [19] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants [D]. London: Academic Press, 1995, 889-890
- [20] Maslenskova L T, Zan ev Y, Popova L P. Adaptation to salinity as monitored by PS II oxygen evolving reactions in barley thylakoids [J]. *Plant Physiology*, 1993, 142: 629-634
- [21] Noeon Park, Joon Ha Kim, Jaeweon Cho. Organic matter, anion, and metal wastewater treatment in Damyang surface-flow constructed wetlands in Korea [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32(1): 68-71
- [22] Patterson S J, Chanasyk D S, Mapfumo E. Effects of diluted kraft pulp mill effluent on hybrid poplar in soil chemical properties [J]. *Irrigation Science*, 2008, 26: 547-560
- [23] R A Herbert. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystem [J]. *Microbiology Reviews*, 1999, 2: 563-590
- [24] Stamford N P, Silva A J, Freitas A D. Effect of sulphur inoculated with Thiobacillus on soil salinity and growth of tropical tree legumes [J]. *Bioresour Technol*, 2002, 81(1): 53-59
- [25] 苏芳莉, 周欣, 陈佳琦, 芦晓峰, 王铁良. 芦苇湿地生态系统对造纸废水中铅的净化研究[J]. 中国环境科学, 2011(5): 768-773
- Su F L, Zhou X, Chen J Q, Lu X F, Wang T L. Purification of Pb in papermaking wastewater by reed wetland ecosystem [J]. *China Environmental Science*, 2011(5): 768-773
- [26] 吴统贵, 吴明, 虞木奎, 萧江华. 杭州湾滨海湿地芦苇生物量及 N、P 储量动态变化 [J]. 中国环境科学, 2010, 10: 1408-1412
- Wu T G, Wu M, Yu M K, Xiao J H. Hangzhou bay coastal wetlands reed biomass and N, P reserves dynamically [J]. *Environmental Science*, 2010, 10: 1408-1412
- [27] 夏江宝, 刘庆, 谢文军, 孙景宽, 刘擎, 陆兆华. 废水灌溉对芦苇地土壤水文特征的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 63-68
- Xia J B, Liu Q, Xie W J, Sun J K, Liu Q, Lu Z H. The effect of reed soil hydrological characteristics by wastewater irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 12: 63-68
- [28] Xiao D L, Deng S H, Li H J. Effects of livestock wastewater on the content of chlorophyll and antioxidant enzyme systems in leaves of Phragmites australis [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6): 2021-2026
- [29] 朱文玲, 崔理华, 朱夕珍, 汤仲恩, 余志敏. 混合基质垂直流人工湿地净化废水效果 [J]. 农业工程学报, 2009(S1): 44-48
- Zhu W L, Cui L H, Zhu X Z, Tang Z E, Yu Z M. Mixed matrix vertical flow constructed wetland purification effect of wastewater [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009(S1): 44-48
- [30] Zhu Y H, Zhang S Z, Huang H L. Effects of maize root exudates and organic acids on the desorption of phenanthrene from soils [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(7): 920-926

责任编辑: 王燕华