

的经验,初步筛选出 22 种植物可用于风电场的环境修复,其中有 7 种乔木类植物:栗子树、核桃树、杉树、松树、侧柏、构树、槐树;8 种草本类植物:狗牙根、高羊茅、三叶草、白茅、早熟禾、紫花苜蓿、小蓬草、薹白;7 种灌木类植物:多花木兰、胡枝子、盐肤木、紫穗槐、悬钩子、高粱泡、野花椒,植物种类分布如图 1 所示。

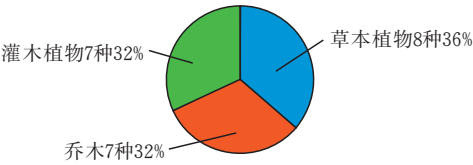


图 1 初筛植物占比

因为不同的植物有不同的特性,笼统的选择具有盲目性,无法精确地优选出最适合风电场区域的植物,如果仅根据植物的某一特性来选择植物,那就忽视了植物的其他优缺点,无法做到全面综合地选择合适的植物。层次分析法作为一种半定量的分析方法,可有助于选择出最为适宜的生态修复植物。

由于有乔木、灌木、草本 3 种不同的植物种类且 3 种植物种类不宜混杂在一起进行选择比较,不能客观地给出各个植物的优劣次序,因此本文分别对乔木类、草本类以及灌木类植物使用层次分析法来优选出适宜风电场区生态修复的优质植物。

1.2 层次分析法

层次分析法,是指将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。

1.2.1 层次结构模型 将决策的目标、考虑的因素和决策对象按它们之间的相互关系分为最高层(目标层)、中间层(因素层)和最低层(方案层)。

根据适应生态学理论中“尊重自然、正视自然、保护自然、恢复自然”的原则,风电场区边坡绿化和生态修复的物种应具有耐干旱贫瘠,适应性强;根系发达,能固持土壤;生长迅速,分枝稠密兼具景观效果;提高土壤的保水保肥能力等特点。因此因素层采用适应性、抗逆性、经济性、再生性、景观性五个因素^[10-18]。根据以上因素可建立生态修复植物优选层次结构模型(图 2)。

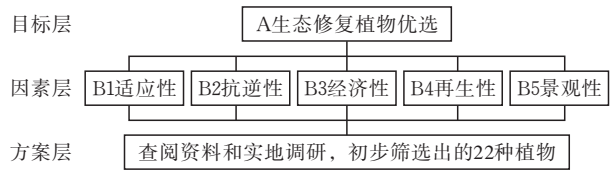


图 2 初选植物选优层次结构

1.2.2 构造判断矩阵 在确定各层次各因素之间的权重时,如果是定性的结果具有片面性,不容易被

别人接受,因此引入判断矩阵:将两个因素进行相互比较,并按其重要程度判定等级,比较结果构成的矩阵称作判断矩阵,重要性等级及其赋值如表 1 所示。

表 1 传统比例标度

量化值	因素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 相比
1	同等重要
3	稍微重要
5	较强重要
7	强烈重要
9	极端重要
2,4,6,8	两相邻判断的中间值

1.2.3 层次单排序及其一致性检验 层次单排序是指对于上一层某因素而言,本层次各因素之间重要性的排序。层次单排序是否合理,需要进行一致性检验,所谓一致性检验是指对判断矩阵 A 确定不一致的允许范围。

用 $\lambda_{\max}-n$ 数值的大小来衡量判断矩阵 A 的不一致程度,定义一致性指标 CI,计算公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$
 (1)

当 $CI=0$,判断矩阵 A 具有完全一致性;当 CI 越大,判断矩阵 A 不一致性越严重。

为了衡量 CI 的大小,引入了随机一致性指标 RI,计算公式如下:

$$RI = \frac{CI_1 + CI_2 + \cdots + CI_n}{n}$$
 (2)

其中,随机一致性指标 RI 和判断矩阵的阶数有关,如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标 RI 标准值

阶数	RI	阶数	RI	阶数	RI
1	0	4	0.90	7	1.32
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24	9	1.45

考虑到一致性的偏离随机性较大,因此检验判断矩阵是否具有满意的一致性时,还应将 CI 和 RI 进行比较,得出检验系数 CR,计算公式如下:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$
 (3)

如果 $CR < 0.1$,则认为判断矩阵 A 不一致性程度在容许范围内,通过一致性检验,此时,可用判断矩阵 A 的特征向量作为权向量,否则就不具有满意一致性,需要对判断矩阵 A 进行校正。

1.2.4 层次总排序 确定某层所有因素对于目标层相对重要性的排序权值过程,称为层次总排序。这一过程是从最高层到最底层依次进行的。对于最高层而言,其层次单排序的结果也就是总排序的结果。

因素层(B) m 个因素对目标层(A)的单排序为 b_1, b_2, \dots, b_m ; 方案层(C) n 个因素对因素层(B)的单排序为 $c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj} (j = 1, 2, \dots, m)$; 方案层(C)的层次总排序即总目标权值为:

$$\omega = \sum_{j=1}^m a_j b_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots)$$

(4)

2 生态修复植物优选

2.1 乔木类优选

2.1.1 乔木植物层次结构模型 根据初次筛选的乔木植物的适应性、抗逆性、经济性、再生性、景观性 5 个因素建立乔木植物层次结构模型。

2.1.2 因素层单排序 不同恢复区有不同的气候特点与本土植物,生态修复的最终目标是修复植物能长期的生存并且与原生植物群落融合,因此选择适应当地气候并易于与当地植物品种结合的植物,有利于维持长期的生态恢复效果;裸露边坡环境恶劣,缺水少肥,在初期养护过后,植物应能靠自然条件持续生长,因此所选植物必须具有抗旱、抗寒等抗逆性能力;边坡生态修复还应考虑植物的种植成本与经济产出,一味追求种植植物而不考虑其生存条件和绿化成本是不可取的,要将生态破坏的损失程度降低到最小;生态修复要考虑对整个植物群落进行逐步修复,既要有快速绿化效果,也要有极强的再生能力,必须具备较好的自我更新能力,才能发挥持久的绿化效果;通过考虑乔灌木与草本植物的合理搭配,形成多层次的立体结构,能够充分利用光、水、气等自然资源,达到最优的景观和生态效益^[19]。因素层 5 个因素成对比较后重要程度打分情况如表 3 所示。

表 3 因素层判断矩阵

	适应性	抗逆性	经济性	再生性	景观性
适应性	1	1/2	5	2	3
抗逆性	2	1	5	3	4
经济性	1/5	1/5	1	1/3	1
再生性	1/2	1/3	3	1	2
景观性	1/3	1/4	1	1/2	1

将表 3 形成矩阵,可求得其最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.07$,并将特征向量归一化得权向量

$$\omega = (0.2736 \ 0.4164 \ 0.0675 \ 0.1586 \ 0.084)^T$$

根据公式(1)得 $CI = 0.0175$ 根据公式(3)得 $CR = 0.016 < 0.1$ 满足一致性检验。

2.1.3 方案层单排序 首先,将方案层中的乔木进行因素对比,通过查阅文献资料得出各类植物的生长特性以及经济价值,并对随州风电场区进行调研(图 3)。现场调研分为春冬两个季节,主要考察植物的抗逆性能以及再生能力,综合分析后对其各因

素重要性比较打分。



图 3 风电场区植被调研

以适应性为例,栗子树吸水、吸肥力强,也耐瘠薄,适应性强;核桃树适应于土壤深厚、疏松、肥沃、湿润、气候温暖凉爽的生态环境,因此栗子树相较于核桃树适应性较为重要,根据表 1 中的打分原则,打分为 5,其他植物适应性打分如表 4 所示。

表 4 乔木适应性判断矩阵

	栗子树	核桃树	杉树	松树	侧柏	构树	槐树
栗子树	1	5	3	2	1	1/3	4
核桃树	1/5	1	1/2	1/3	1/5	1/9	1/2
杉树	1/3	2	1	1/2	1/3	1/7	1/2
松树	1/2	3	2	1	1/2	1/4	2
侧柏	1	5	3	2	1	1/3	4
构树	3	9	7	4	3	1	8
槐树	1/4	2	2	1/2	1/4	1/8	1

将表 4 形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.13$,并将特征向量归一化得权向量

$$\omega_1 = (0.1724 \ 0.033 \ 0.0518 \ 0.097 \ 0.1724 \ 0.4153 \ 0.0581)^T$$

$CI = 0.021, CR = 0.016 < 0.1$ 满足一次性检验。

将方案层中的乔木进行因素对比,以抗逆性为例,栗子树喜光,耐旱耐寒,对空气中的二氧化硫等有害气体抗性强;核桃树高大,抗旱性强,抗寒能力差,在比较寒冷地区容易遭受冻害,因此栗子树相较于核桃树抗逆性为较重要,根据表 1 的打分原则,打分为 4,其他乔木两两比较并打分后形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.13$,特征向量归一化得权向量

$$\omega_2 = (0.15720 \ 0.04380 \ 0.03230 \ 0.2378 \ 0.0985 \ 0.3674 \ 0.0631)^T$$

$CI = 0.021, CR = 0.019 < 0.1$ 满足一次性检验。

将方案层中的乔木根据经济性对比,栗子树被作为优秀的风景树栽植,栗子含有丰富的营养物质;核桃树木材坚实,是很好的硬木材料,核桃仁可生吃和榨油,因此栗子树相较于核桃树经济性为稍重要,根据表 1 的打分原则对其打 2 分,其他乔木两两比较并打分后形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.1$,特征向量归一化得权向量

$$\omega_3 = (0.0396 \ 0.0265 \ 0.1006 \ 0.1795 \ 0.2657 \ 0.1224 \ 0.2657)^T$$

$CI = 0.017, CR = 0.013 < 0.1$ 满足一次性检验。

将方案层中的乔木根据再生性对比,栗子树根系损伤后愈合能力较差,根部破伤后,皮层与木质部易分离,伤根后需较长时间才能萌发新根;核桃树越

冬能力差,遭遇冻害会导致枝干皮裂甚至整株树死亡,因此栗子树相较于核桃树相较于再生能力为同等重要,根据表 1 的打分原则对其打 1 分,其他乔木两两比较并打分后形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=7.08$,特征向量归一化得权向量

$\omega_4=(0.0765\ 0.0765\ 0.046\ 0.046\ 0.3669\ 0.2515\ 0.1366)^T$
 $CI=0.013, CR=0.01<0.1$ 满足一次性检验。

将方案层中的乔木根据景观性对比,栗子树在各地的园林绿化中,被作为优秀的风景树栽植;核桃树秋冬季节开始枯萎,树上变得光秃,因此栗子树相较于核桃树景观功能为较重要,根据表 1 的打分原则,对其打 4 分,其他乔木两两比较并打分后形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=7.15$,特征向量归一化得权向量

$\omega_5=(0.1358\ 0.0386\ 0.0703\ 0.2351\ 0.1358\ 0.0596\ 0.3249)^T$
 $CI=0.025, CR=0.016<0.1$ 满足一次性检验。

2.1.4 乔本植物总排序 根据公式(4)得出方案层(C)目标权值:

$\omega=(0.1388\ 0.0444\ 0.0476\ 0.1647\ 0.1757\ 0.3198\ 0.1091)^T$
目标权值为构树>侧柏>松树>栗子树>槐树>杉树>核桃树,故最后推荐选取构树、侧柏和松树为适合本地区生态修复的乔木。

2.2 草本类优选

2.2.1 草本植物层次结构模型 根据初次筛选的草本植物的适应性、抗逆性、经济性、再生性、景观性五个因素建立草本植物层次结构模型。

2.2.2 因素层单排序 权向量

$\omega=(0.2736\ 0.4164\ 0.0675\ 0.1586\ 0.084)^T$

2.2.3 方案层单排序 将方案层中的草本植物进行因素对比,以适应性为例,打分情况如表 5 所示,将表 5 形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=8.0834$,特征向量归一化得

$\omega_6=(0.2367\ 0.1372\ 0.0412\ 0.0795\ 0.2367\ 0.0524\ 0.0792\ 0.1372)^T$
 $CI=0.0119, CR=0.0084<0.1$ 满足一次性检验。

对方案层中的各草本植物根据植物自有属性对其他因素进行对比,按照表 1 的打分原则,两两比较打分后形成矩阵并求得权向量。

方案层对比于因素层 B2(抗逆性):

$\omega_7=$
 $(0.2972\ 0.1672\ 0.0585\ 0.1031\ 0.0364\ 0.1031\ 0.0672\ 0.1672)^T$
 $CI=0.011, CR=0.008<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B3(经济性):

$\omega_8=$
 $(0.1974\ 0.0401\ 0.1974\ 0.0686\ 0.1104\ 0.3023\ 0.0299\ 0.054)^T$
 $CI=0.013, CR=0.009<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B4(再生性):

$\omega_9=$

$(0.1909\ 0.1909\ 0.3578\ 0.0343\ 0.0436\ 0.1018\ 0.0273\ 0.0536)^T$
 $CI=0.025, CR=0.018<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B5(景观性):

$\omega_{10}=$
 $(0.0399\ 0.0399\ 0.2138\ 0.1034\ 0.0808\ 0.3319\ 0.1504\ 0.0399)^T$
 $CI=0.011, CR=0.008<0.1$ 满足一次性检验。

表 5 草本适应性判断矩阵

	狗 牙根	高 羊茅	三 叶草	白 茅	早熟 禾	紫 苜蓿	小 蓬草	薹 白
狗牙根	1	2	5	3	1	4	3	2
高羊茅	1/2	1	3	2	1/2	3	2	1
三叶草	1/5	1/3	1	1/2	1/5	1/2	1/2	1/3
白茅	1/3	1/2	2	1	1/3	2	1	1/2
早熟禾	1	2	5	3	1	4	3	2
紫苜蓿	1/4	1/3	2	1/2	1/4	1	1/2	1/3
小蓬草	1/3	1/2	2	1	1/3	2	1	1/2
薹白	1/2	1	3	2	1/2	3	2	1

2.2.4 草本植物总排序 根据公式(4)得出方案层(C)目标权值:

$\omega=(0.2355\ 0.1435\ 0.1237\ 0.0834\ 0.1011\ 0.1217\ 0.0686\ 0.1227)^T$
目标权值为狗牙根>高羊茅>三叶草>薹白>紫苜蓿>早熟禾>白茅>小蓬草,故最终选取狗牙根、高羊茅和三叶草为适合本地区生态修复的草本植物。

2.3 灌木类优选

2.3.1 灌木植物层次结构模型 根据初次筛选的灌木植物的适应性、抗逆性、经济性、再生性、景观性五个因素建立灌木植物层次结构模型。

2.3.2 因素层单排序 权向量

$\omega=(0.27360.41640.06750.15860.084)^T$

2.3.3 方案层单排序 将方案层中的灌木植物进行因素对比,以适应性为例,打分情况如表 6 所示,将表 6 形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=7.08$,特征向量归一化得:

$\omega_{11}=(0.1391\ 0.2711\ 0.2344\ 0.0569\ 0.2344\ 0.0306\ 0.0335)^T$

表 6 灌木适应性判断矩阵

	多花 木兰	胡 枝子	盐 肤木	紫 穗槐	悬 钩子	高 粱泡	野 花椒
多花木兰	1	1/3	1/2	3	1/2	6	5
胡枝子	3	1	1	5	1	8	7
盐肤木	2	1	1	4	1	7	6
紫穗槐	1/3	1/5	1/4	1	1/4	2	2
悬钩子	2	1	1	4	1	7	6
高粱泡	1/6	1/8	1/7	1/2	1/7	1	1
野花椒	1/5	1/7	1/6	1/2	1/6	1	1

将表 6 形成矩阵,求得最大特征值 $\lambda_{\max}=7.08$,特征向量归一化得:

$\omega_{11}=$
 $(0.1391\ 0.2711\ 0.2344\ 0.0569\ 0.2344\ 0.0306\ 0.0335)^T$
 $CI=0.013, CR=0.01<0.1$ 满足一次性检验。

对方案层中的各灌木植物根据植物自有属性对其他因素进行对比,按照表 1 的打分原则,两两比较打分后形成矩阵并求得权向量如下。

方案层对比于因素层 B2(抗逆性):
$$\omega_{12} = (0.2865 \ 0.2865 \ 0.1423 \ 0.1208 \ 0.0573 \ 0.0468 \ 0.0598)^T$$
 $CI=0.041, CR=0.03<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B3(经济性):
$$\omega_{13} = (0.1438 \ 0.3886 \ 0.085 \ 0.2269 \ 0.0386 \ 0.0585 \ 0.0585)^T$$
 $CI=0.027, CR=0.02<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B4(再生能力):
$$\omega_{14} = (0.1172 \ 0.199 \ 0.3084 \ 0.0692 \ 0.0285 \ 0.0313 \ 0.2464)^T$$
 $CI=0.03, CR=0.02<0.1$ 满足一次性检验。

方案层对比于因素层 B5(景观功能):
$$\omega_{15} = (0.1318 \ 0.0714 \ 0.2461 \ 0.3937 \ 0.0394 \ 0.0445 \ 0.0732)^T$$
 $CI=0.013, CR=0.01<0.1$ 满足一次性检验。

2.3.4 灌木植物总排序 根据公式(4)得出方案层(C)目标权值:

$$\omega = (0.1967 \ 0.2573 \ 0.1987 \ 0.1252 \ 0.0984 \ 0.4051 \ 0.0832)^T$$

目标权值为胡枝子>盐肤木>多花木兰>紫穗槐>悬钩子>高粱泡>野花椒,故最终推荐胡枝子、盐肤木和多花木兰为适合本地区生态修复的灌木植物。

3 结论

采用 AHP 层次分析法,在实地调研与文献查阅的基础上建立了风电场区生态修复层次分析模型,从适应性、抗逆性、再生性、经济性以及景观性对初步选出的 22 种植物打分并形成判断矩阵,根据判断矩阵的权向量对植物的筛选进行了半定量的分析,为风电场区边坡生态修复植物的选择提供支撑。最终优选出 9 种植物适合风电场区生态修复,分别是乔木类属植物构树、侧柏、松树;草本类属植物狗牙根、高羊茅、三叶草;灌木类属植物胡枝子、盐肤木、多花木兰。

层次分析法不仅能较客观地对多指标进行综合评价,与其他评价方法相比,层次分析法的评价指标之间具有更高的区分度,但其在权重赋值、植物得分方面具有一定的主观性和片面性,得分情况没有结合试验数据,因此在后续的研究中应根据具体的地理环境条件,将理论与实践相结合,对植物进行更合理的权重赋值。植被恢复是一个长期的过程,需要对这一过程从恢复机理、恢复技术、恢复效果的角度给予科学的解释,并且对植被恢复效果做长期观测与研究。

[参 考 文 献]

[1] 汪鑫.风电场的建设对环境影响分析[J].湖北农机化, 2019(10):12-13.

[2] 黄金岩.风电场建设项目生态环境影响及保护对策[J]. 低碳技术, 2017(12):113-114.

[3] 张文静.风电场选址探究[J].湖北农机化, 2019(13): 82-83.

[4] 柴亚凡,马金珠,周波,等.戈壁荒漠区风电场建设对水土流失的影响[J].水土保持通报, 2014, 34(2): 124-127.

[5] 王森,杨月梅,曹艳芳,等.风电场建设对区域环境影响及生态修复对策探究[J].科技创新与应用, 2017(6): 178-179.

[6] 毕娜,浅谈铁岭地区风电场生态修复技术要求[J]. 环境保护与循环经济, 2014, 34(11):54-55,66.

[7] Xu Kang, He Lingchao, Hu Hanjian, et al. Positive ecological effects of wind farms on vegetation in China's Gobi desert[J]. Scientific reports, 2019, 9(1):1-11.

[8] 刘浩军,杨卫斌,胡蒋霞.绿色发展当典范——江西永丰风电场修复[J].国土绿化, 2018(9):66-69.

[9] 刘胜,顾小华.云南风电建设区生态修复区划及对策研究[J].环境与可持续发展, 2017(1):122-125.

[10] 黄元贞,刘海平,马良,等.基于层次分析法评价 12 种虾脊兰属植物的观赏性和生长适应性[J].福建农业大学学报, 2018, 47(6):667-672.

[11] 王月,李东亮.基于层次分析法的采石场生态恢复植物选择[J].河北工程大学学报, 2013, 30(3):96-99.

[12] 段军,梁智广.基于模糊层次分析法的采矿方法优选[J].化工矿物与加工, 2017(12):53-56.

[13] 汪绿培,陈新新.基于模糊层次—主成分分析法的河道生态护坡综合评价[J].水利科技与经济, 2018, 24(8): 38-42.

[14] Amine Belhadi, Fatima Ezahra Touriki, Said Elfezazi. Evaluation of critical success factors (CSFs) to lean implementation in SMEs using AHP [J]. International Journal of Lean Six Sigma, 2019:803-829.

[15] 常建娥,蒋太立.层次分析法确定权重的研究[J].武汉理工大学学报. 2017, 29(1):153-156.

[16] 张吉军.模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学, 2000, 14(2):80-88.

[17] Amanda Lange Salvia, Luciana Londero Brandli, Walter Leal Filho, et al. An analysis of the applications of Analytic Hierarchy Process (AHP) for selection of energy efficiency practices in public lighting in a sample of Brazilian cities[J]. Energy Policy, 2019, 132:854-864.

[18] Bilal Kilic, Caglar Ucler. Stress among ab-initio pilots: A model of contributing factors by AHP[J]. Journal of Air Transport Management, 2019, 80:425-436.

[19] 米勇,米秋菊,王洁,等.坝上地区风电场水土保持植物措施筛选研究[J].海河水利, 2019(3):24-26.

Optimization of Plants for Ecological Restoration of Wind Farm Slope Based on Analytic Hierarchy Process

WANG Hanwen¹, YANG Zhiyong^{1,2}, WAN Juan^{1,2}, LI Zhun¹

(1 School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;
2 Hubei Eco-Road Engineering Research Center, Wuhan 430000, China)

Abstract: To repair bare slope in wind farm area and guarantee the green development of wind farm, according to the principle of ecological restoration, and combined with various characteristics of plants, the optimization of ecological restoration plants is carried out. 22 species of primary screening plants are first determined according to the results of field investigation, and then the hierarchical chart of plant optimization is constructed by using the analytic hierarchy process. Then, the weights of adaptability, resistance, economy, regeneration and landscape are sorted, and the target weights are obtained according to the weights of factor layers. Finally, the high-quality plants suitable for the ecological restoration of the region are selected on this basis. The results show that there are nine high quality plants suitable for restoration in this area: Cynodon dactylon, festuca arundinacea and Oxalis which belong to herbaceous plants; Lespedeza bicolor, Rhus chinensis and Magnolia multiflora which belong to shrub; Broussonetia papyrifera, platycladus orientalis and pines which belong to tree. The research results can provide reference for ecological restoration of slope in wind farm area. In the follow-up study, we can combine theory with practice according to the specific geographical environment conditions, and assign more reasonable weights to plants. Long-term observation and research are needed for the effect of vegetation restoration.

Keywords: ecological restoration; wind farm; analytic hierarchy process; screening; high quality plant

[责任编辑：裴 琴]

(上接第 19 页)

Design of LCL Grid Connected Inverter based on Single Closed Loop Control and Multiple PR Controllers

PAN Jian, LIANG Jiacheng, CHEN Fengjiao, LI Kun, LI Jiacheng

(Hubei Key Laboratory of Solar Energy Efficient Utilization and Storage Operation Control ,
School of Electrical and Electronic Engineering , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problem of resonance peak of LCL inverter and its influence on grid connected power quality, the current feedback algorithm of superposition of proportional capacitor current and grid connected current is adopted to eliminate the influence of inherent resonance peak of LCL inverter. Several resonance rings are added on the basis of proportional resonance controller to restrain low-frequency harmonic and resonant current content of grid connected current, so as to improve the current to grid Accuracy of control and stability of grid connected system. Finally, the LCL filter parameters of 2kW grid connected inverter are designed, and the feasibility of the control algorithm is verified by the simulation and experiment platform on MATLAB/SIMLINK.

Keywords: LCL inverter; single current loop feedback; multiple proportional resonance controller

[责任编辑：张岩芳]

[文章编号] 1003—4684(2020)04-0075-05

GM(1,1)灰色模型在软基沉降预测中的应用

胡其志^{1,2}, 刘 恒¹, 田 锐¹

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2 湖北省桥梁安全监控技术与装备技术工程中心, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 依托武穴长江大桥北岸接线段工程,根据沉降监测实测数据,采用三次样条插值方法将非等时距实测数据转换成等时距序列,建立等时距灰色 GM(1,1)模型。利用 matlab 编程对模型进行计算,对处理后的软基沉降进行预测。利用经典的双曲线法和三点法分别进行沉降预测,并将预测曲线与基于等时距的灰色模型预测曲线进行对比,结果表明:灰色 GM(1,1)模型预测精度更高,预测结果更可靠。基于等时距的灰色模型为软基处理后的沉降预测提供一种重要方法,对软基处理的施工具有一定的指导意义。

[关键词] 灰色模型; 软土处理; 高速公路; 沉降预测

[中图分类号] U416.1, TU196.2 [文献标识码] A

在高速公路建设施工过程中,为避免造成经济损失和人员伤亡,对软土路基沉降提出了较高要求。因此,有效掌握软基沉降的发展规律并准确预测分析最终沉降对于指导工程施工、降低工程成本、确保工程质量具有极为重要的实际意义。

软土路基的沉降变形是一个影响因素众多、变化漫长的过程,如何能在较短时间内得到较为准确的结果^[1],国内外学者对软土路基沉降预测进行了大量的研究工作。目前常用的曲线拟合预测方法有理论计算法、拟合曲线法^[2]、Asaoka 法^[3]、遗传人工神经网络法^[4]等。黄广军^[5]用数学方法对预测地基沉降的 Asaoka 法的表达式进行分析,探讨其拟合参数的误差对沉降预测结果的影响,提出了拟合参数误差放大系数的概念,并对预测结果的可靠性进行分析和评估。杨涛^[6]等基于双曲线拟合法,推导出恒载下地基沉降速率与剩余沉降之间的关系式、剩余沉降与工后沉降之间的关系式,据此建立了超载预压卸荷沉降速率标准的计算公式,并给出公式中相关参数的确定方法。万臣^[7]等基于组合预测思想,结合 BP 神经网络和马尔科夫链 2 种预测方法,构建了一种新维 BP 神经网络—马尔科夫链大坝沉降预测模型。但是,大部分预测方法未全面考虑软土路基沉降的影响因素,或者算法冗繁不易实现,对预测精度产生影响。

灰色理论^[7-10]具有理论性强、应用价值高等优

点,是将复杂离散的非等时距实测沉降数据处理成以一定规律变化的等时距序列,建立微分方程对后期沉降进行数据预测,其算法简洁明晰,且避免分析软土路基沉降影响因素,提高了沉降预测精度。

由于受到施工环境和监测条件的限制,部分地基处理工程未能测取到足够多的沉降数据。针对传统的双曲线法、三点法沉降预测模型的不足,将实测数据等时距化并采用灰色 GM(1,1)模型建立微分方程对软基沉降进行预测分析,并验证灰色理论的适用性,最后将三种模型预测结果进行对比分析,为其他同类研究提供借鉴。

1 GM(1,1)灰色模型

灰色系统理论由我国学者邓聚龙教授于 1982 年创立,以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象,主要通过部分已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,通过序列算子的作用实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。其特点是“少数据建模”,着重研究“外延明确,内涵不明确的对象”。由于灰色系统理论对实验观测数据没有特殊的要求和限制,因此在工程建设、经济管理、农业科学、控制科学、生命科学等领域得到广泛应用。

1.1 建立模型

由于沉降监测受到现场施工条件、环境气候等

[收稿日期] 2019—12—02

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51609081)

[第一作者] 胡其志(1969—),男,湖北红安人,湖北工业大学教授,研究方向为路基工程,岩土工程

[通信作者] 刘 恒(1992—),男,湖北武穴人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为软基处理

因素的影响,其实测沉降数据为非等时距序列,在建立模型之前利用三次样条^[11]插值法将其等时距。实测数据在等时距后的序列为 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(N)\}$ 。对等时距的系列进行一次累加得:

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(N)\} \tag{1}$$

假设式(1)中的 $X^{(1)}$ 满足一阶常微分方程:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u$$

其中: a 是常数,称为发展灰数; u 称为内生控制灰数,是对系统的常定输入。

对等时距取样的离散值表达($t_0=1$)为:

$$X^{(1)}(k+1) = \left[X^{(1)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \tag{2}$$

灰色建模途径是将等时距后的序列进行一次累加,得到式(1)的累加系列,后采用最小二乘法来估计常数 a 与 u 。构造数据矩阵如下:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} [x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1)] & 1 \\ -\frac{1}{2} [x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1)] & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2} [x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1)] & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$U = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \tag{4}$$

联立式(3)和式(4),用最小二乘法估计可得:

$$\hat{U} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{u} \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T y \tag{5}$$

把估计值 \hat{a} 与 \hat{u} 代入式(2)并结合式(5)可得时间响应方程:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(1)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}k} + \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \tag{6}$$

当 $k=1,2,\dots,N-1$ 时,由式(6)算得的 $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 是拟合值;当 $k \geq N$ 时, $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 为预测值。这是相对于一次累加序列 $x^{(1)}$ 的拟合值,用后减运算还原,当 $k=1,2,\dots,N-1$ 时,就可得原始序列 $x^{(0)}$ 的拟合值 $\hat{x}^{(0)}(k+1)$;当 $k \geq N$,可得原始序列 $x^{(0)}$ 的预测值。

1.2 精度检验

采用后验差检验, $x^{(0)}$ 的方差

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [x^{(0)}(k) - \bar{X}]^2}$$

其中: \bar{X} 为 $x^{(0)}$ 的均值。

残差的方差

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=2}^N [E(k) - \bar{E}]^2}$$

其中: $E(k)$ 为残差, \bar{E} 为残差的均值。

后验差比值

$$C = \frac{S_2}{S_1}$$

小误差概率

$$P = P\{|E(k) - \bar{E}| < 0.6745S_1\}$$

以上所得后验差比值 C 和小误差概率 P 按表1对计算精度进行综合评价。若 C 和 P 都在规定的范围内,其中 C 越小越好(即原始序列方差大而残方差小), P 越大越好(即残差与残差均值之差小于给定值 $0.6745S_1$)。因此表1中 P 的数字大, C 的数字小,那么预测的精度就好,反之就不合格,则所建立的灰色模型精度符合要求;否则,需对残差进行修正,直到精度符合要求为止。

表1 预测精度对照表

预测精度	P	C
好	>0.95	<0.35
合格	>0.80	<0.45
勉强	>0.70	<0.50
不合格	≤0.70	≥0.65

2 工程应用

2.1 工程概况

武穴长江大桥北岸接线段软土路段总长约5762 m,主要分布于K149+509—K152+504 黄泥湖农场段及K155+820—K159+346 长江北岸冲积平原段,占路线全长约31.2%。主要为淤泥、淤泥质土,间夹软塑—流塑状态的粘性土以及软弱的粉土,静力触探PS值普遍≤0.75,埋深较浅,软土厚度多在5~12 m之间。采用固结排水对软土进行处理,软土段路基采用挖除换填、水泥搅拌桩、水泥搅拌桩和欠载预压及水泥搅拌桩和等载预压四种处理措施,预压期为4—6个月,并在堆载预压的过程中进行沉降监测。

沉降监测按照设计要求埋设沉降板,采用二等水准测量对路基沉降进行观测。本文选取K150+480典型断面作为考查对象,其堆载预压高度随时间变化曲线和实测沉降量随时间变化曲线如图1所示。其实测沉降数据与时间间隔如表2所示。其中数据采集的频率为:时间数据周期为4—6个月,现场总沉降量数据为:222.51~327.94 mm之间。

2.2 GM(1,1)灰色系统模型预测

根据图1和表2中K150+480断面的实测沉降数据,依次选取前10组、15组、20组实测沉降数据,并利用MATLAB对序列采用三次样条插值方法进行等时距处理后,对该断面的后期沉降进行预测。利用MATLAB软件将三次样条插值方法处理成等距离序列的具体过程为:1)输入时间序列;2)输

入初始数值;3)进行循环;4)程序得出函数的曲线;
5)将依次得出的曲线连成一段完整曲线;6)超出时
间序列终止程序、程序运行结束。

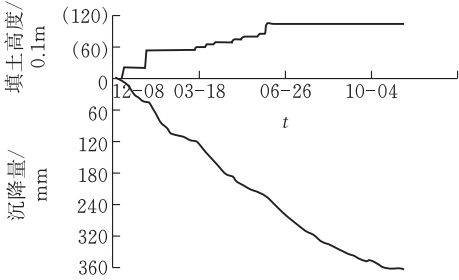


图 1 K150+480 断面总沉降量-填土高度-时间

表 2 K150+480 断面实测沉降数据

序号	t/d	总沉降量/mm	$\Delta t/d$
1	197	222.51	0
2	202	226.89	5
3	205	235.65	3
4	211	246.61	6
5	217	255.76	6
6	223	261.36	6
7	226	266.70	3
8	232	274.82	6
9	240	281.33	8
10	244	286.49	4
11	248	290.87	4
12	251	294.73	3
13	256	297.95	5
14	262	306.50	6
15	265	308.75	3
16	271	311.43	6
17	277	317.19	6
18	284	320.07	7
19	286	324.64	2
20	293	327.94	7

2.2.1 选择前 10 组数据进行预测 将前 10 组数据
利用 MATLAB 软件采取三次样条插值方法处理成
等时距序列,三次样条插值如图 2 所示。

前 10 组数据序列预测公式:

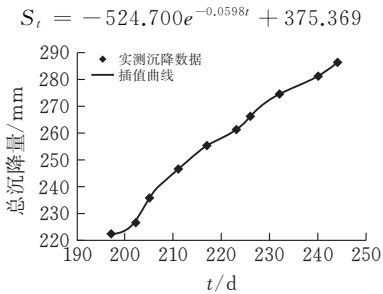


图 2 K150+480 断面取 10 组数据三次样条插值

2.2.2 选择前 15 组数据进行预测 将前 15 组数据
利用 MATLAB 软件采取三次样条插值方法处理成
等时距序列,三次样条插值如图 3 所示。

前 15 组数据序列预测公式:

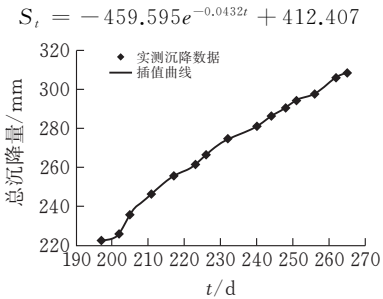


图 3 K150+480 断面取 15 组数据三次样条插值

2.2.3 选择前 20 组数据进行预测 将前 15 组数据
利用 MATLAB 软件采取三次样条插值方法处理成
等时距序列,三次样条插值如图 4 所示。

前 15 组数据序列预测公式:

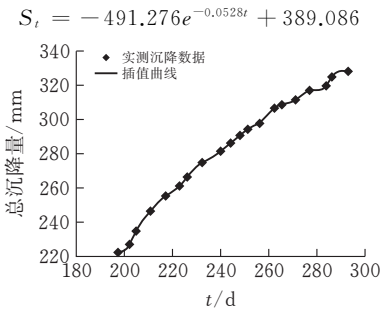


图 4 K150+480 断面取 20 组数据三次样条插值

2.2.4 计算时间参数 当选取 10 组、15 组、20 组
数据采用三次样条插值法等时距处理进行灰色模型
预测时,对应的时间序列分别为:

$$T_{10} = 5.2222d; T_{15} = 4.8571d$$
$$T_{20} = 5.0526d$$

其中 $d=1,2,3,\cdots,n$ 。时间序列如表 3 所示。

表 3 时间序列

t/d	10 组	15 组	20 组
302	301.4	303.9	303.1
307	306.7	308.7	308.2
312	311.9	313.6	313.2
317	317.1	318.4	318.3
322	322.3	323.3	323.3
327	327.6	328.1	328.4
332	332.8	333.0	333.4
337	338.0	337.9	338.5
342	343.2	342.7	343.5
347	348.7	347.6	348.6
352	353.7	352.4	353.6
357	358.9	357.3	358.7

3 成果分析

选取 10 组、15 组、20 组采用 GM(1,1)灰色模
型预测曲线和实测沉降数据曲线对比如图 5 所示。

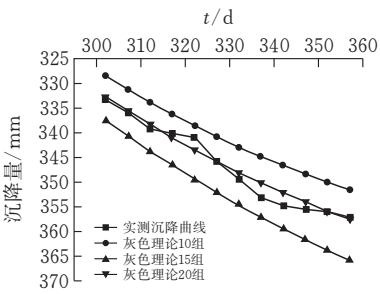


图 5 K150+480 断面 G(1,1)预测与实测沉降

由图 5 可知，在选取实测数据组数较多的情况下，沉降预测曲线的变化趋势就与实测沉降曲线越接近，预测结果就越精确。反之，在选取的实测数据组数较少的情况下，沉降预测曲线收敛速度较快，与实测沉降曲线的变化趋势产生了较大的偏离，预测结果精确性较差，说明选取的实测数据序列维数对灰色理论预测有直接的影响。第 302~357 d 预测沉降数据与实测沉降数据对比如表 4 所示。

表 4 不同数据组数时灰色理论预测值与实测值分析

t/d	实测值	10 组		15 组		20 组	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
302	333.23	328.39	−1.45	337.53	1.29	332.67	−0.17
307	335.99	331.16	−1.44	340.70	1.40	335.57	−0.13
312	339.08	333.78	−1.56	343.73	1.37	338.33	−0.22
347	355.49	348.34	−2.01	361.65	1.73	354.02	−0.41
352	355.98	349.97	−1.69	363.80	2.20	355.82	−0.04
357	357.15	351.50	−1.58	365.85	2.44	357.52	0.10

表 4 显示，在利用灰色模型预测时，选取的实测沉降数据序列组数越多，预测结果的相对误差就越小，反映出预测结果越精确。说明选取的实测数据序列组数越多，预测曲线的变化趋势与实测沉降曲线越吻合，预测结果越可靠。

基于第 302~357 d 实测沉降数据，利用双曲线法和三点法进行沉降预测。双曲线法是一种基于纯经验的拟合方法，沉降量计算公式为：

$$\frac{t-t_0}{S_t-S_0}=A+B(t-t_0)$$

三点法又称为固结度对数配合法，是由曾国熙（1959）提出的一种采用实测荷载与沉降时间曲线来预测沉降的方法。沉降量计算公式为：

$$S_t=S_dTe^{-U_t}+S(1-Te^{-U_t})$$

根据双曲线法和三点法所得沉降预测结果与 GM(1,1)灰色模型预测结果对比分析如表 5 所示。

表 5 GM(1,1)灰色理论与三点法、双曲线法预测对比

t/d	实测值	双曲线法		三点法		灰色理论(20 组)	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
327	345.72	350.87	1.49	341.43	−1.24	345.76	0.01
332	349.42	353.65	1.21	346.52	−0.83	347.99	0.41
337	353.07	356.53	0.98	349.01	−1.15	350.11	0.84
342	354.79	358.59	1.07	351.53	−0.92	352.11	0.76
347	355.49	359.47	1.12	352.89	−0.73	354.02	0.41
352	355.98	358.65	0.75	354.34	−0.46	355.82	0.04
357	357.15	360.33	0.89	359.54	0.67	357.52	0.10

表 5 显示，采用 GM(1,1)灰色理论模型预测结果要明显精确于采用三点法、双曲线法的预测结果。

4 结论

- 1)GM(1,1)灰色理论模型的本质是通过
- 对原始数据进行一次累加生成，得到较强规律性的曲线后，再用指数曲线拟合得到生成模型。在利用灰色理论模型预测沉降时，采用的实测沉降数据序列组数越多和时间间隔越大，预测结果的精度就越可靠。
- 2)实测沉降数据的等时距处理对 GM(1,1)灰色理论模型预测沉降有很大影响。相较于三点法和

- 双曲线法，GM(1,1)灰色理论模型预测结果更为可靠。
- 3)对于软土路基沉降曲线的非线性特征，GM(1,1)灰色理论模型预测沉降结果可以较好地与实测沉降数据相符，该预测模型可为类似已知信息量少、不确定因素多的工程沉降预测研究提供借鉴。

[参 考 文 献]

[1] 闫爱军.高层建筑沉降预测的灰色模型研究[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):227-230.

- [2] 潘林有,谢新宇.用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J].岩土力学,2004(7):1053-1058.
- [3] Asaoka A.Observational procedureof settlement prediction[J].Soils and Foundations,2008,18(4) :87-101.
- [4] 谭衢霖,魏健,胡吉平.基于小波神经网络的建筑工程沉降变形预测[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(3):629-636.
- [5] 黄广军.Asaoka 法预测软土地基沉降时存在的问题和对策[J].岩土力学,2016,37(4):1061-1065,1074.
- [6] 杨涛,张文彦,李国维,等.基于双曲线拟合法的超载预压卸荷沉降速率标准研究[J].中国公路学报,2010,23(3):10-14,28.
- [7] 赖文杰,齐昌广,郑金辉,王新泉,左殿军.含分数阶的灰色模型及其在地基沉降预测中的应用[J].水文地质工程地质,2019,46(3):124-128,137.
- [8] 胡习阳,曾志雄,符梁,等.张桑高速公路路基沉降预测方法研究[J].公路工程,2018,43(4):278-282.
- [9] 张庆伟,肖建清.GM(1,1)与 Verhulst 模型在地基沉降预测中的适用性比较[J].沈阳工业大学学报,2014,36(6):716-720.
- [10] 何飞. 高速铁路路基基础工后沉降预测的相关研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [11] 王天化. 一种改进的径向基函数拟插值方法[D].长春:吉林大学,2014.

Application of GM(1,1) Grey Model in Soft Foundation Settlement Prediction

HU Qizhi^{1,2}, LIU Heng¹, TIAN Kun¹

(1 School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China ;
2 Hubei Bridge Safety Monitoring Tech. and Equipment Tech .Engin. Center , Wuhan 430068,China)

Abstract: In order to solve the problem of soft ground settlement on the expressway of the North Bank Connection Section of the Wuxue Yangtze River Bridge Project, according to the observed settlement data and based on the grey system theory, the non-isochronous measured data are converted into isochronous series by cubic spline interpolation method. The grey GM (1, 1)model is established and the soft foundation settlement prediction curve is calculated by Matlab programming. The curve is compared with hyperbolic method and three-point method. The results show that the prediction precision of GM (1, 1) model is higher and the prediction result is more reliable, which can provide the scientific decision-making basis for the similar engineering soft soil roadbed settlement prediction.

Keywords: Grey Model; Soft Soil Subgrade; expressway; settlement prediction

[责任编辑:裴 琴]

[文章编号] 1003—4684(2020)04-0080-05

钙基聚合硫酸铁添加对河道底泥电渗脱水的影响

李明珠¹, 杨 楠¹, 肖 航¹, 张会琴^{1,2}, 刘德富^{1,2}, 皮科武^{1,2}

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 通过控制钙基聚合硫酸铁(CaPFS)的投加量对某河道底泥进行电渗脱水实验,探索 CaPFS 投加量对底泥 pH、电导率、脱水能耗、脱水能效及脱水过程中底泥温度、粒径分布的影响。结果表明:在 CaPFS 最佳投加量为 0.3~0.5 gFe/kgDS(绝干泥)、电渗脱水电压为 10 V 时,可将含水率为 68.0%的底泥降低至 58.6±0.4%,脱水能效为 0.07±0.01 kWh/kg 滤液,其脱出水 pH 为 10.6±0.3,电导率为 728.1±7.5 μs/cm。实验发现随 CaPFS 的加入,底泥电渗脱水经历三个阶段,第一阶段以电泳为主,第二阶段以电渗脱水为主,第三阶段则以离子电迁移为主,且三阶段内脱水能效和含水率整体呈“U”形,而出水电导率呈“∩”形。

[关键词] 钙基聚合硫酸铁;河道底泥;电渗脱水;脱水能效

[中图分类号] X705 [文献标识码] A

随着城市快速发展和工业化进程的加快,城市河道水体污染日趋严重,其污染一方面来自外源污染,另一方面则来自于河道底泥污染物缓慢释放形成的内源污染,因此对城市河道底泥的治理成为河道整治工作的重中之重,也是确保河道环境持续稳定的根本^[1]。由于河道底泥存在“二高一低”(高含水率、高压缩性、低渗透性)的普遍问题,对其处理带来了极大的困难,如何降低其含水率,减少其堆放体积与所需堆放场所是首要问题。

电渗透脱水是一种有效的脱水技术,其率先应用于吹填土固结^[2]、海相软粘土排水固结^[3]等方面,后被应用于低渗透系数土质的工程排水及市政污泥的深度脱水^[4-5]。然而,电渗透用于底泥的深度脱水普遍存在能耗高、脱水时间长等问题^[6]。如何通过前期调理改善底泥的物化性质,缩短疏浚底泥脱水时间,并降低其能耗值得深入研究。

笔者利用自行研制的钙基聚合硫酸铁,以改善底泥颗粒的性质,探索其强化底泥电渗脱水性能的规律,以此提高河道底泥的电渗脱水速度,缩短脱水时间,降低脱水能耗。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 CaPFS 的制备 在本实验室前期研究的基

础上^[7],通过过氧化氢氧化法制备出聚合硫酸铁,然后加入一定量的氯化钙粉末,控制实验温度共聚反应 4 h,即制得钙基聚合硫酸铁(CaPFS)液态产品,对 CaPFS 通过真空干燥即获得固态产品,研磨到所需粒径即为 CaPFS 粉末,备用。

1.1.2 河道底泥样品 实验所用底泥取自湖北省武汉市洪山区巡司河河道,北纬 N30°29′8.14″东经 E114°18′21.46″。为保证试验底泥一致性,一批采样 500~1000 kg,先用 10 目网筛将树枝、石头等杂质去除,而后充分搅拌均匀备用。预处理后底泥的相关理化指标如表 1 所示。

表 1 本实验所用底泥的理化性质

指标名称/单位	数值
含水率/%	68.0
pH	7.4
电导率/(μs·cm ⁻¹)	602
总磷含量/(mg·kg ⁻¹)	1220.8
平均粒径/μm	16.5

1.2 实验步骤

电渗脱水:在实验室前期实验结果基础上^[8],选择河道底泥电渗脱水最佳电压为 10 V,取 1.1.2 所备含水率 68.0%的底泥 100 g,加入 1.1.1 制备的 CaPFS,再将底泥盛置于自制的电渗脱水装置,此时底泥厚度约为 2 cm。接通电源,调节输出电压

[收稿日期] 2019—10—22

[基金项目] 国际合作水污染防治重大科技项目(2017ZX07101003—008)

[第一作者] 李明珠(1995—),女,湖北荆门人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为河道底泥处理

[通信作者] 皮科武(1975—),男,湖北益阳人,工学博士,湖北工业大学教授,研究方向为淤污泥生态处理与清洁生产

10 V,并在脱水装置底端用容器接纳电渗出水、称重,即构成电渗脱水实验。待连续电渗 5 min 内出水低于 1 g,即为电渗脱水终点,停止实验,分析数据。

非电渗脱水:过程同上述电渗脱水,但无需接通电源,即电压为 0。

CaPFS 投加量:设定 CaPFS 投加量在 0~3.0 gFe/kgDS 不等,即按 1 kg 脱水底泥干基(DS)投加的 CaPFS 中全 Fe 的量来计算。

1.3 分析与计算

1)含水率(WC):指淤泥中水分所占的比例

$$WC\% = 1 - DSC\% = 1 - \frac{S_3 - S_1}{S_2 - S_1} \times 100\% = \frac{S_2 - S_3}{S_2 - S_1} \times 100\%$$

式中:DSC 为污泥含固率,%;S₁表示空蒸发皿质量,g;S₂表示蒸发皿和湿样质量,g;S₃表示蒸发皿和烘干样质量,g。

2)脱水能耗(EC):指达到脱水终点时所消耗的累计能耗

$$EC = \int UI dt$$

式中:EC 为能耗,kWh 或 Wh;U 为电压,V;I 为电流,A;t 为脱水时间,min。

3)脱水能效(EEC):脱除 1 kg 水所消耗的电能,单位 kWh/kg 滤液

$$EDC = \frac{\int UI dt}{m_f}$$

式中:EDC 为脱水能效,kWh/kg 滤液;m_f为滤液质量,kg;U、I 与 t 同式(2)。

4)脱水效率(DE):脱除水的质量占底泥中总水质量的百分比

$$DE\% = \frac{m_f}{m_{sw}} \times 100\%$$

式中:m_f为滤液质量,g;m_{sw}为原底泥中水的质量,g。

5)电极电流密度(ECD):电极单位面积所通过的电流

$$ECD = \frac{I}{S}$$

式中:ECD 为电极电流密度,A/m²;I 为通过电极的电流大小,A,S 为电极表面积,m²,本实验有效电极面积为 0.0031 m²。

6)其它指标:水样和泥样 pH 采用 pH 仪(PHS-3C,中国),粒径采用激光粒度仪(Mastersizer 2000,英国)进行测定,电导率采用电导率仪(DDS-307,中国)及泥饼温度采用探针土壤测温仪(CEM DT-131,中国)进行实时测定^[9]。

2 结果与讨论

2.1 CaPFS 最适投加量的确定

图 1 为不同投加量下的泥饼含水率和脱水效率的变化情况。随着时间的变化脱水效率呈现先快速上升然后达到极限平衡的趋势。原因是在电渗透过程中随着水分的脱除,上层泥饼逐渐干化,引起电阻增大,导致脱水效率逐渐变慢最终达到脱水极限。

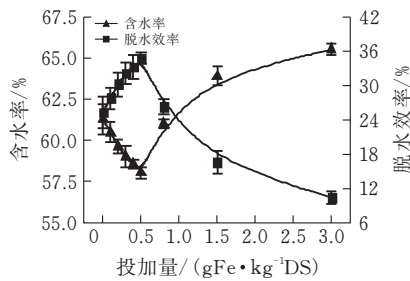


图 1 CaPFS 投加量对底泥含水率与脱水效率的影响

如图 1 所示,对原泥直接电渗脱水时,电渗脱水 70 min 即可达到终点,此时泥含水率 61.3±0.9%,脱水效率为 25.4±2.9%。逐渐增加 CaPFS 投加量到 0.5 gFe/kgDS 时,电渗脱水后底泥含水率在 58.1±0.4%,脱水效率可达 34.9±0.1%。进一步加大 CaPFS 投加量到 3.0 gFe/kgDS 时,电渗脱水后底泥含水率和脱水效果均呈现下降趋势,因此,CaPFS 强化电渗脱水时,并非其投加量越多越好。分析认为投入泥中电解质逐渐增加,系阳离子携带水分向阴极运动的能力增强所致^[10]。由图 1 可知,对含水率 68% 的河道底泥采用电渗脱水时,控制 CaPFS 投加量在 0.5 gFe/kgDS 及以下较为合适。对图 1 所示 CaPFS 投加量与底泥含水率及脱水效率进行分析,分别可得到如下关系,如式(1)和(2)所示。

底泥最终含水率

$$WC(x) = \begin{cases} 55.61 + 5.72 \cdot e^{(-1.69x)} (R^2 = 1.000, 0 \leq x \leq 0.5) \\ 65.72 - 9.56 \cdot e^{(-1.34x)} (R^2 = 1.000, 0.5 < x) \end{cases} \quad (1)$$

底泥脱水效率

$$DE(x) = \begin{cases} 41.15 - 15.77 \cdot e^{(-1.82x)} (R^2 = 1.000, 0 \leq x \leq 0.5) \\ 9.33 + 47.05 \cdot e^{(-1.25x)} (R^2 = 1.000, 0.5 < x) \end{cases} \quad (2)$$

式中:WC(x)为底泥最终含水率,%;x 为 CaPFS 投加量,gFe/kgDS;DE(x)为电渗脱水效率,%。

2.2 对电渗出水 pH 的影响

底泥在电场作用下,底泥颗粒间游离水及其阳离子不仅可随电场向阴极移动,同时由于施加的电压超过了电极溶出电压,使阳极溶出腐蚀及颗粒间游离水发生电解,导致电渗出水 pH 发生改变,其脱水效率也随之变化,如图 2 所示。

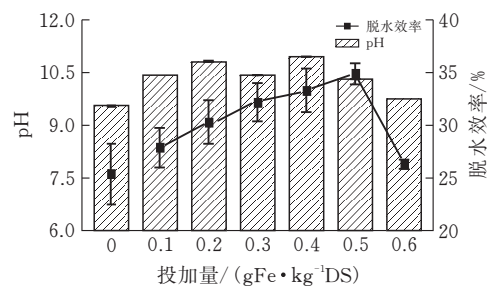


图2 出水 pH 与底泥脱水效率随 CaPFS 投加量的变化

电渗出水 pH 随 CaPFS 投加量增加而逐渐上升,当 CaPFS 投加量为 0.4 gFe/kgDS 时,水样 pH 上升到 10.8,而后下降到 9.6(CaPFS 投加量为 0.6 gFe/kgDS)。在电场力的作用下,除了电泳和电迁移迫使水分子向阴极移动外,也会发生水的电解,阴极产生的部分 OH⁻ 会被电渗出水带出,导致滤液 pH 增加^[11]。

2.3 对电渗出水电导率的影响

电渗透脱水速率主要由底泥的 Zeta 电位及所施加的电流密度等因素决定^[12],而底泥电导率对其 Zeta 电位以及电渗透脱水过程中的电极电流密度具有一定影响,因此必然会对底泥的电渗透脱水效果产生作用,如图 3 所示。

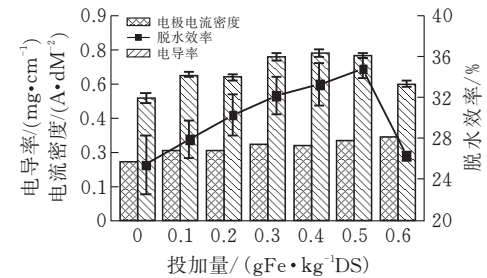
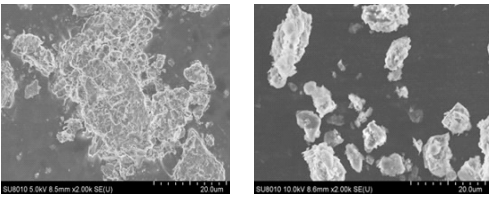


图3 不同投加量下电渗出水电导率、电极电流密度与脱水效率的变化

CaPFS 的添加明显提高了出水电导率,而当 CaPFS 投加量为 0.6 gFe/kgDS 时,电导率下降,其原因是此时电渗脱水效率下降导致水分子携带离子的能力减弱^[13]。电导率与电渗脱水效率呈现相似的变化,当 CaPFS 投加量逐渐增加,CaPFS 离解产生更多的带电离子压缩底泥双电层,促使脱水效率增加;而当 CaPFS 投加量过多,在电场作用下,胶粒表面电荷会发生逆转,造成胶体重新稳定,降低絮凝效果。吸附架桥理论指出,只有在絮凝剂投加量适当时,即胶体粒子部分表面被覆盖才能在微粒间产生有效的吸附架桥作用,并获得最佳絮凝效果。原泥聚集成团,表面吸附性强,其内包裹水分难于脱除,添加一定量的 CaPFS 后,泥团絮体成团现象得以缓解,结构松散成块,降低了颗粒对吸附水和结合水的持有能力,利于脱水,如图 4 所示。



(a)未加CaPFS (b)添加CaPFS

图4 CaPFS 的添加对底泥颗粒絮团形态变化的影响

2.4 对电渗脱水能耗的影响

电渗脱水过程当中能耗的影响如图 5 所示。同一含固率时,随 CaPFS 投加量增加,能耗先呈现下降而后上升。如当含固率为 38%,未投加 CaPFS 时,能耗为 1.07 Wh,0.1 gFe/kgDS 的投加量时,对应能耗为 0.95 Wh,而 0.6 gFe/kgDS 的投加量时,能耗达到 1.45 Wh。

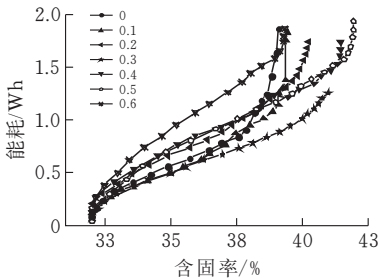


图5 电渗脱水累计能耗随底泥含固率的变化

CaPFS 的投加在一定程度上会降低脱水终点对应的底泥含水率(即固含率增加)(图 6),如未投加 CaPFS 时,脱水终点时底泥含水率为 61%,施加 0.5 gFe/kgDS 的投加量时,则脱水终点底泥对应含水率为 58%,因此,CaPFS 的加入可提高底泥脱水效率,降低最终底泥的含水率。

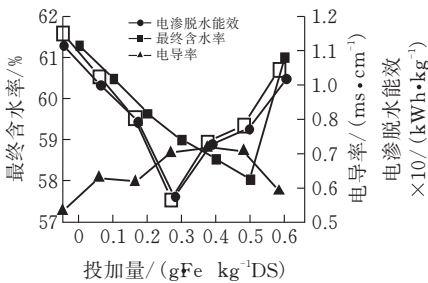


图6 投加量对底泥最终含水率、电渗脱水能效与电导率的影响

底泥电渗透脱水过程不仅仅是粒子间歇水的渗出,更是水中阴阳离子的电迁移、胶体粒子及絮团电泳,同时也包含电极溶出及水的电解过程^[14]。CaPFS 投加对泥饼含水率、出水电导率及脱水能效的影响可分为以下三个阶段:

第一阶段,高效高含水率(CaPFS 投加量 < 0.3 gFe/kgDS):加入泥样电解质较少,泥样电导率低,因而电渗电流较低,能耗相对较低,电渗出水

较少,因此最终泥饼含水率高,但脱水能效高。此阶段以电泳为主。

第二阶段,低能效低含水率(CaPFS 投加量 0.3~0.5 gFe/kgDS),泥样中 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 及 SO_4^{2-} 等增加,电极电流增加,用于离子电迁移的电耗增加相对较少,而耗于电泳和电渗的电能必然增加,因此电渗出水增多,含水率达到最低,但增加电耗,因此脱水能效达到最低。此阶段以电渗脱水为主。

第三阶段,电位反向阶段(CaPFS 投加量 >0.5 gFe/kgDS),进一步增加 CaPFS 投加量,在电渗脱水条件下,底泥颗粒电位反向抑制颗粒间歇水渗出,泥饼最终含水率增加,出水电导率下降。此阶段以电迁移为主。

因此,脱水能效和含水率整体呈现“U”型,而电导率呈现“∩”型。

2.5 泥饼温度随电渗脱水变化

由于电流通过泥饼,电渗透脱水过程中部分电能以热量的形式散出,且泥饼温度与电极电流大小有一定的关系,如图 7 所示。

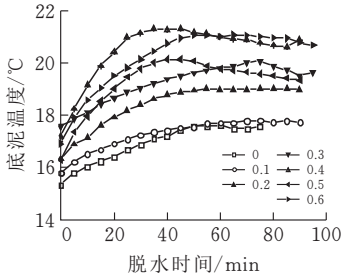


图 7 CaPFS 投加量对泥饼温度随电渗时间变化的影响

未添加 CaPFS 的底泥达到脱水终点的最高温度为 18℃左右,而添加了 CaPFS 的底泥脱水时泥饼的最高温度可达 21℃,温度变化趋势整体随 CaPFS 投加量的增加而上升。由于温度升高利于降低泥样的粘度,电渗透脱水将朝有利的方向发展,但温度升高也是电能释放的一种形式,增加了脱水总能耗,导致脱水能效降低。

2.6 CaPFS 投加量对粒径的影响

CaPFS 的投加改变底泥颗粒表面与粒子间胶体电性,利于颗粒胶体双电层的压缩,颗粒间歇水易于渗出。颗粒重新聚集为较大颗粒,形成利于水分子渗出的粒子间通道;而过量添加 CaPFS,促使底泥颗粒呈现反向电性,颗粒基本维持单个或低聚合状态,粒子间不易形成渗水通道,泥样水分难于脱除。不同 CaPFS 投加量对粒径的影响如表 2 所示。

当 CaPFS 投加量为 0.1 与 0.3 gFe/kgDS 时, D_{50} 为 $12.64\pm0.18\text{ }\mu\text{m}$ 和 $11.26\pm0.10\text{ }\mu\text{m}$,略大于未投加药剂的 D_{50} 为 $10.98\pm0.10\text{ }\mu\text{m}$,但随着投加

量的增加,当投加量为 0.5 gFe/kgDS 与 0.6 gFe/kgDS 时, D_{50} 为 $10.65\pm0.09\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10.70\pm0.06\text{ }\mu\text{m}$,略低于原泥的 D_{50} ;同时,观察表 2 可以得出 D_{90} 随 CaPFS 投加量变化先增大后减小的规律。在无机絮凝剂絮凝过程中,污泥粒径由两个过程共同决定:首先,污泥颗粒由于桥接和电性中和、沉淀网捕而迅速聚集成大的絮凝物,随着反应时间的延长,由压缩双电层引起的聚集体水分剥离,絮凝物尺寸逐渐减小。随后,当聚集速率与断裂速率达到平衡时,絮体粒径达到稳定。因此,絮凝剂使粒径减小是由于絮体断裂速率大于聚集速率所致。同时,颗粒粒径并非越小越好,粒径过小将增加底泥脱水的阻力,合适颗粒粒径组成的底泥能脱除更多的水分^[12],所以当 CaPFS 投加量为 0.6 gFe/kgDS 时,脱水效率出现降低的现象。

表 2 底泥粒径随 CaPFS 投加量增加的分布变化

Fe 投加量/ (gFe/kgDS)	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
0	1.98 ± 0.01	10.98 ± 0.10	34.79 ± 0.74
0.1	2.14 ± 0.01	12.64 ± 0.18	37.83 ± 0.64
0.3	2.00 ± 0.01	11.26 ± 0.10	35.45 ± 0.67
0.5	1.91 ± 0.01	10.65 ± 0.09	34.14 ± 0.66
0.6	1.92 ± 0.01	10.70 ± 0.06	34.47 ± 0.72

3 结论

1)当 CaPFS 投加量在 0.3~0.5 gFe/kgDS 时,可获得含水率为 $58.6\pm0.39\%$ 脱水底泥,此时脱出水 pH 为 10.6 ± 0.27 ,电导率为 $728.1\pm7.46\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$,脱水能效为 $0.07\pm0.01\text{ kWh}/\text{kg}$ 滤液。

2)CaPFS 调理河道底泥电渗脱水过程可随 CaPFS 投加量的变化分为三个阶段,第一阶段以电泳为主,第二阶段以电渗脱水为主,第三阶段以电迁移为主,三阶段内脱水能效和含水率整体呈现“U”型,而电导率呈现“∩”型。

3)河道底泥添加适当的钙基聚合硫酸铁(CaPFS)可提高其电渗脱水效果,当 CaPFS 投加量为 0.5 gFe/kgDS 时,底泥絮体结构由松散块状变为密集团状,有效降低了颗粒间结合水;当 CaPFS 投加量增加到 0.6 gFe/kgDS 时, D_{50} 和 D_{90} 进一步减小,细小颗粒增加了底泥脱水的阻力,导致脱水效率下降。

[参 考 文 献]

[1] 李志忠,刘培,周路宝. 中小河道治理中的清淤及淤泥处理技术[J]. 中国水运, 2018(12): 66-67.
[2] 黄书岭,冯夏庭,张传庆. 岩体力学参数的敏感性综

- 合评价分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2624-2630.
- [3] 郝杰, 侍克斌, 陈功民, 等. 基于围岩力学参数概率分布模型的变形敏感性灰关联分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 854-860.
- [4] Sun Z, Gao M, Yu X. Vacuum preloading combined with electro-osmotic dewatering of dredger fill using electric vertical drains [J]. Drying Technology, 2014, 33(7): 847-853.
- [5] Rao B, Huang G, Lu X, et al. An ultrahigh-pressure filtration and device design and optimize study on high dry dewatering of sludge [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 106:129-137.
- [6] 卢宁, 文一波, 魏婧娟. 污泥的电渗透脱水技术研究进展[J]. 环境科学与管理, 2010(3): 85-87, 95.
- [7] 陈文文. 钙基聚合硫酸铁对河湖污泥脱水固磷研[D]. 武汉:湖北工业大学, 2017.
- [8] Mahmoud A, Olivier J, Vaxelaire J, et al. Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludgedewatering[J]. Water Research, 2010, 44(8): 2381-2407
- [9] Leland J. Jackson, Jacob Kalff, Joseph B. Rasnussen. Sediment pH and redox potential affect the bioavailability of Al, Cu, Fe, Mn, and Zn to rooted aquatic macrophytes[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1993, 50(1):143-148.
- [10] 卢宁, 莫文宁, 魏婧娟, 等. 硝酸钠强化污泥电渗透脱水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2012, 28(1): 68-70.
- [11] Acar Y B, Alshawabkeh A N. Principles of electrokinetic remediation[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(13): 2638-2647.
- [12] Citeau M, Larue O. Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge[J]. Water Research, 2011, 45(6): 2167-2180.
- [13] Chen G H, Lai Keith C K, Lo Irene M C. Behavior of electro-osmotic dewatering of biological sludge with salinity[J]. Separation Science and Technology, 2003, 38(4): 903-915.
- [14] Mahmoud A, Andrew F A. Hoadley, Citeau M, et al. A comparative study of electro-dewatering process performance for activated and digested wastewater sludge [J]. Water research, 2018, 129: 66-82.
- [15] Sorensen P B, Christensen J R, Bruus J H. Effect of small scale solids migration in filter cakes during filtration of waste water solids suspensions[J]. Water Environment Research, 1995, 67(1): 25-32.

Effect of CaPFS Addition on Electroosmotic Dewatering for River Sediment

LI Mingzhu¹, YANG Nan¹, XIAO Hang¹, ZHANG Huiqin^{1,2}, LIU Defu^{1,2}, PI Kewu^{1,2}

(1 School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;

2 Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of lakes and Utilization of Algae, Wuhan 430068, China)

Abstract: Sediment, the main source of endogenous pollution, is an important part of river and lake system. After dredging, the sediment contains complex pollutants and high water content, resulting in serious secondary pollution without proper disposal. In this paper, a kind of coagulant named calcium-based poly ferric sulfate (CaPFS) was employed to dehydrate the sediment on the consideration of dosage on the pH, conductivity and dewatering energy consumption for per kg filtrate. The variation of energy efficiency, temperature of sediment and particle size distribution during dewatering were also presented. It showed that the final water content of the sediment decreased to $58.6 \pm 0.4\%$ from initial of 68.0% on the optimal dosage of $0.3 \sim 0.5$ gFe/kgDS (Dry Solid) and a cell voltage of 10 V. The dewatering energy efficiency was 0.07 ± 0.01 kWh/kg filtrate, the pH of the filtrate was 10.6 ± 0.3 and the conductivity was 728.1 ± 7.5 μ S/cm. It is also found the electroosmotic dewatering for the river sediment undergoes three stages as the addition of CaPFS increasing, electrophoresis, electrophoresis and ion migration orderly. The dewatering energy efficiency and final water content of mud cake are in the shape of "U" as a whole, while conductivity of filtrate presents a shaped "∩".

Keywords: calcium-based poly ferric sulfate (CaPFS); river sediment; electroosmotic dewatering; Energy efficiency of dewatering

[责任编辑: 裴 琴]