

生态护坡生境基材土壤肥力动态变化研究

丁瑜^{1,2}, 胡文静¹, 夏振尧^{1,2}, 李博¹, 姚小月³, 许文年^{1,2}

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

3. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:分析植被恢复过程中基材土壤肥力,为进一步改进生境基材性能、完善植被混凝土生态防护技术提供科学依据。在湖北省宜昌市选择清江水布垭电站公路边坡(S样地)、高坝洲电站进厂公路边坡(G样地)和三峡大学图书馆后边坡(T样地)等3个植被混凝土生态修复边坡,采用系统布点法,在坡面5~10 cm深度处取环刀样,对生境基材多年份(2007~2012年)土壤主要肥力因子进行定量测定,并采用T-S模糊神经网络模型对肥力水平进行综合评价分析。结果表明:有机质S样地由13.34 g/kg增加至32.89 g/kg,G样地由14.78 g/kg增加至35.02 g/kg,T样地在5.65~22.87 g/kg缓慢、波动增长;土壤全氮含量S样地0.12~2.27 g/kg,G样地0.13~1.64 g/kg,T样地0.08~0.84 g/kg;速效氮含量S样地23.94~170.87 mg/kg,G样地31.70~237.51 mg/kg,T样地20.88~122.28 mg/kg;全磷变化范围S样地2.30~2.66 g/kg,G样地1.64~2.06 g/kg,T样地1.63~2.18 g/kg;速效磷S样地2007、2009年异常丰富,均在300 mg/kg以上,其余年度为36.23~154.29 mg/kg,G、T样地变化规律与S样地类似;速效钾G样地波动范围在59.87~207.03 mg/kg,S样地、T样地波动幅度较小且总体处于丰富水平。各样地综合肥力指数随着监测时间的推移,总体是逐渐减小趋于稳定,综合肥力指数S样地3.14~2.69,G样地3.25~2.73,T样地3.47~2.74。总体上各样地综合肥力水平呈现先增长后稳定的发展趋势,肥力综合等级处于中等向上水平。

关键词:边坡;生境基材;土壤肥力;动态变化;T-S模糊神经网络

中图分类号:S158,X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)02-0031-07

土壤是植物生长最为重要的物质基础和环境,其理化性质及演化趋势直接影响着植物的生长发育和群落的动态演替(Bbojvaid et al, 1998; Joel & Timmer, 2010)。对于工程扰动形成的裸露边坡,植被混凝土生态护坡技术通过构筑生境基材为植被提供生长条件,实现边坡生态修复目标,该技术在扰动边坡生态防护中得到广泛应用(许文年等, 2012)。生态基材是经人工改良的,具有一定强度且适宜植物生长的特殊土壤(夏振尧等, 2011),是生态护坡体系核心功能构件,基材肥力状况是保证坡面植物生长、演替,确保边坡生态恢复效果的关键,研究基材肥力特性、动态变化可为完善和改进边坡生态防护技术提供依据。

近年来,对生态护坡基材土壤肥力研究已取得

一些进展。牛海波等(2010)和许阳等(2012)选择了4处植被混凝土生态防护样地边坡,对相邻年份土壤主要肥力因子进行了定量测定分析与研究;王志泰等(2012)采用定位研究法,对3处不同坡向、坡度边坡在人工植被建植后第1、第2年内进行跟踪测试,获得了基材土壤主要养分因子每月的变化趋势;赵自超等(2013)采用空间代替时间法研究了扰动边坡植被恢复过程中的土壤性质研究,结果表明随着植被的恢复,土壤理化性质逐渐改良。这些工作取得了恢复初期基材土壤理化性质、肥力特征的短期、月季变化方面的重要认识。

此外,通过边坡样地监测取样、测试和分析不同肥力因子的变化特征,基于肥力因子动态变化,对基材肥力进行评价。基材肥力评价主要有标准综合级别方法、模糊评判法和神经网络法等方法。上述方法各有优缺点,标准综合级别法计算简便,评价结果便于比较;模糊评判法对多因子赋权时计算繁琐,工作量大;而神经网络法对样本数据的需求量大(张宇等2012)。

本文以实施植被混凝土生态防护工程的边坡为

收稿日期:2015-08-14

基金项目:国家“十二五”科技支撑项目(2012BAC06B02-04);
国家自然科学基金项目(51278281)。

作者简介:丁瑜,1980年生,男,副教授,主要从事滑坡机理与边坡生态防护研究。E-mail: thirddding@163.com

通信作者:许文年。E-mail: xwn@ctgu.edu.cn

研究对象,通过样地多年监测、测试,分析基材肥力长期动态变化特征;采用 T-S 模糊神经网络模型获得基材土壤综合肥力,分析植被恢复过程中基材土壤肥力的演替规律,为进一步改进生境基材性能、完善植被混凝土生态防护技术提供科学依据。

1 样地概况及研究方法

1.1 研究区及样地概况

以湖北省宜昌市为研究区,选取 3 个实施植被混凝土生态防护工程的边坡为样地。宜昌市地处长江上游与中游的交汇地,鄂西山区向江汉平原的过渡地带,地理坐标 110°15′ ~ 112°04′E、29°56′ ~ 31°34′N。该区四季分明,春秋较长,年平均降水量 992.1 ~ 1 404.1 mm,雨季为 6、7 月份,雨热同季,全年积温较高,无霜期较长,年平均气温 13.1 ~ 18℃。

选取的 3 个边坡样地分别为清江水布垭电站公

路边坡(S 样地)、高坝洲电站进厂公路边坡(G 样地)和三峡大学图书馆后边坡(T 样地)(图 1)。根据基材常用配比,考虑边坡特征、土壤差异等因素,综合确定护坡基材的配比如表 1。3 个边坡生态防护工程使用的基材配比基本一致,施工工艺、后期养护相同。由于施工时间不同,3 个样地恢复年数各有差异,截至 2012 年,3 个样地边坡恢复年数分别为 12、10、8 年。



图 1 取样边坡
Fig. 1 Pictures of Plot G and Plot T

表 1 取样边坡概况
Tab. 1 Information on the experimental slopes

编号	样地名称	基材配比(质量比)	完工时间
S 样地	清江水布垭电站公路边坡	土壤:水泥:有机质:添加剂=100:7.8:5:4.6	2000.04
G 样地	清江高坝洲电站公路边坡	土壤:水泥:有机质:添加剂=100:8:5:5	2002.03
T 样地	三峡大学图书馆后边坡	土壤:水泥:有机质:添加剂=100:7.8:5:4.6	2004.03

1.2 样地监测与试样测试

3 个样地在实施初期,结合养护管理进行了监测、取样工作。自 2007 年开始,为了改良基材、完善边坡生态防护技术体系,对实施生态防护工程的边坡进行了持续监测。结合边坡实际,对每个样地边坡采用系统布点法,在坡面 5 ~ 10 cm 深度处取环刀样。

样品经自然风干、磨细和过筛,进行肥力指标测试。为综合反映基材土壤肥力特征,肥力因子指标选取主要依据:(1)应充分反应基材土壤的养分状况、物理性状、生物特征和土壤环境等;(2)遵循稳定性高且较易测量、对植被生长有重大影响以及差异性大且相关性小的原则。土壤有机质是植物矿物质和有机质营养的源泉,氮、磷、钾则是表征有机质及土壤肥力的 3 大主要元素,均显著影响植物的生长发育。为此,参考天然土壤肥力因子,结合植被混凝土基材肥力已有研究基础(吴彬等, 2014),确定 3 个样地基材土壤肥力因子如表 2。

试样肥力因子测定方法如下(章家恩,2006):土壤容重采用环刀法测定;有机质采用 K₂Cr₂O₇ 容量法-外加加热法;速效氮采用扩散吸收法;全氮采用浓 H₂SO₄ 消煮-扩散吸收法;全磷采用 NaOH 熔融

-钼锑抗比色法;速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用 1 mol/L 中性 CH₃COONH₄ 溶液浸提-火焰光度法测定。各年度每年取样 2 次,每个样品进行 3 次重复,取平均值,由此得到样地基材土壤 2007-2012 年肥力因子。

2 基材土壤肥力评价模型

2.1 T-S 模糊神经网络模型

T-S 模糊神经网络模型是由 Takagi 和 Sugeno 于 1985 年提出的一种模糊推理模型。该模型是模糊系统和人工神经网络互补性的结合,具有自适应能力很强的模糊系统,不仅能够自动更新,而且能不断修正模糊子集的隶属度函数(孙增圻和徐红兵, 1997),既考虑到基材土壤肥力的模糊性,又能达到基材土壤肥力的合理评价。

T-S 模糊系统采用“if-then”规则形式来定义,在规则为 Rⁱ 的情况下,模糊推理如下:

$$R^i: \text{if } x_1 \text{ is } A_1, x_1 \text{ is } A_1, \dots, x_k \text{ is } A_k, \\ \text{then } y_i = p_0^i + p_1^i x_1 + \dots p_k^i x_k \quad (1)$$

式中: A_iⁱ 为模糊系统的模糊集; p_iⁱ (j = 1, 2, ..., k) 为模糊系统参数; y_i 为根据模糊规则得到的输出,输入部分(即 if 部分)是模糊的,输出部分(即

then 部分)是确定的,该模糊推理表示输出为输入的线性组合。

假设对于输入量 $x=[x_1,x_2,\cdots,x_k]$, 首先根据模型规则计算各输入变量 x_j 的隶属度:

$$\mu_{A_j}^i=\exp[-(x_j-c_j)^2/b_j^i]$$

(2)

式中: c_j 、 b_j 分别为隶属度函数的中心和宽度; k 为输入参数 $j=1,2,\cdots,k$; n 为模糊子集数, $i=1,2,\cdots,n$ 。

对各隶属度进行模糊计算,采用模糊算子为连乘算子:

$$w^i=\mu_{A1}(x_1)\times\mu_{A2}(x_2)\times\cdots\times\mu_{Ak}(x_k)$$

(3)

根据模糊计算结果计算模糊模型的输出值 y_i :

$$y_i=\sum_{i=1}^n w^i(p_0^i+p_1^i x_1+\cdots+p_x^i x_k)/\sum_{i=1}^n w^i$$

(4)

T-S 模糊神经网络分为输入层、模糊化层、模糊规则计算层和输出层。输入层与输入向量 x_i 连接,节点数与输入向量的维数相同。模糊化层采用隶属度函数(2)对输入值进行模糊化得到模糊隶属度值 u 。模糊规则计算采用模糊连乘公式(3)计算得到 w 。输出层采用公式(4)计算模糊神经网络的输出 y 。

模糊神经网络的学习算法如下:

1) 误差计算

$$e=\frac{1}{2}(y_d-y_c)^2$$

(5)

式中: y_d 是网络期望输出; y_c 是网络实际输出; e 为期望输出和实际输出的误差。

2) 系数修正

$$p_j^i(k)=p_j^i(k-1)-\alpha\frac{\partial e}{\partial p_j^i}$$

(6)

$$\frac{\partial e}{\partial p_j^i}=(y_d-y_c)w^i/\sum_{i=1}^m w^i\cdot x_j$$

(7)

式中: p_j 为神经网络系数; α 为网络学习率; x_j 为网络输入参数; w^i 为输入参数隶属度连乘积。

3) 参数修正

$$c_j^i(k)=c_j^i(k-1)-\beta\frac{\partial e}{\partial p_j^i}$$

(8)

$$b_j^i(k)=b_j^i(k-1)-\beta\frac{\partial e}{\partial p_j^i}$$

(9)

式中: c_j 、 b_j 分别为隶属度函数的中心和宽度。

2.2 基于 T-S 模糊神经网络的肥力评价

基于 T-S 模糊神经网络的土壤肥力评价模型,其算法流程如图 2。根据选取的基材肥力评价因子,则输入数据维数为 7,输出数据维数为 1。由此,确定网络的输入节点个数为 7,输出节点个数为 1,隶属度函数个数为 14。

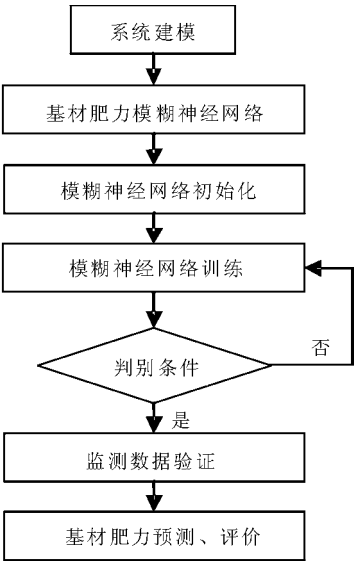


图 2 基于 T-S 模糊神经网络的基材土壤肥力综合评价
Fig.2 Process for comprehensive evaluation of substrate soil fertility based on the T-S fuzzy neural network

根据表 2 所示的各肥力因子分级标准,采用 Matlab 的 linspace 函数在各级评价标准之间按随机均匀分布方式内插生成训练样本和学习样本。各级评价标准之间生成 2 000 个样本,其中 1 500 个作为训练样本,其余 500 个作为学习样本。小于 I 级标准的训练样本和学习样本的期望目标为按照生成训练样本和学习样本的内插比例产生对应的 0~1.5 之间的数值。同理, I、II 级标准之间的训练样本和检验样本的期望目标为内插产生对应的 1.5~2.5 之间的数值; II、III 级和 III、IV 级以及 IV、V 级标准相

表 2 基材土壤肥力因子及其评价标准

Tab.2 Evaluation standards for soil fertility of the substrate

评价等级	容重/ g·cm ⁻³	有机质/ g·kg ⁻¹	速效氮/ mg·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹
I	<1.0	>80	>150	>1.5	>160	>20	>1.5
II	≥1.0	≤80	≤150	≤1.5	≤160	≤20	≤1.5
III	≥1.25	≤50	≤100	≤1.0	≤100	≤10	≤1.0
IV	≥1.50	≤30	≤50	≤0.75	≤50	≤5.0	≤0.75
V	≥1.75	≤10	≤25	≤0.5	≤30	≤3.0	≤0.5

应的期望目标分别为 2.5~3.5、3.5~4.5、4.5~5.5 之间的数值。根据上述思路,确定 I、II、III、IV、V 各级土壤肥力的网络输出范围分别为: <1.5、1.5~2.5、2.5~3.5、3.5~4.5、>4.5。

利用上述生成的训练样本和学习样本对模糊神经网络进行训练与学习,然后利用训练好的模糊神经网络对基材土壤肥力进行综合评价。

3 结果与分析

3.1 基材肥力因子动态变化

通过监测取样、测试分析,得到各样地基材土壤肥力因子动态变化,结果如下。

土壤容重一定程度上能反映土壤质地与结构、透气性、透水性能及保水性能。土壤容重值越小,说明土壤中孔隙数量较多,土地比较疏松,透气透水性越好。采用植被混凝土进行生态防护时,通过添加一定量的水泥加强土体之间的连接,确保基材具有足够的强度和抗冲刷性能,使得初期土体容重值较大。工程实施初期,基材土壤容重 1.80~1.90 g/cm³。随着边坡恢复时间增加,植被生长,植物根系与水分侵蚀作用使得基材土壤逐渐趋于疏松,其容重将减小。监测结果显示,随着边坡恢复时间增加,各样地基材土壤容重均呈下降趋势(图 3a)。3 个样地的容重监测结果与实际吻合。

有机质是土壤肥力的重要物质基础,能增加土壤的保肥供肥能力,提高基材土壤养分的有效性。取样结果表明,3 个样地的有机质随恢复年数增加呈缓慢增长趋势,S 样地由 13.34 g/kg 增加至 32.89 g/kg,G 样地由 14.78 g/kg 增加至 35.02 g/kg,T 样地在 5.65~22.87 g/kg 缓慢、波动增长(图 3b)。基材土壤中有有机质一方面来源于配置的添加,另一方面来源于边坡草灌丛凋落物形成的有机质(周明涛等,2010)。边坡恢复过程中,随着草灌植被的生长、凋落、分解,基材中有有机质明显增加。不过,由于有机质的形成受植物生长、微生物作用、水热条件等众多因素制约,因此,基材中有有机质含量呈现波动。

土壤氮素是植物必需的营养元素,其密度是土壤氮储量的重要指标之一,氮含量的高低反映了某一区域土壤氮储量的大小(白军红等,2008)。随着边坡恢复时间的推移,各样地基材土壤全氮含量呈上升趋势(图 3c)。不同恢复阶段土壤全氮含量之间存在差异,S 样地 0.12~2.27 g/kg,G 样地

0.13~1.64 g/kg,T 样地 0.08~0.84 g/kg,S 样地与 G 样地全氮从显著缺乏水平过渡到丰富水平,T 样地从显著缺乏水平过渡到中等水平。速效氮含量呈波动性上升趋势(图 3d)。S 样地 23.94~170.87 mg/kg,G 样地 31.70~237.51 mg/kg,T 样地 20.88~122.28 mg/kg。监测结果显示,速效氮除 2012 年外,均处于相对缺乏水平。

土壤磷素是植物生理过程重要的元素之一,是植物生长不可缺少的基本营养元素。各样地基材土壤全磷在监测期间较稳定,全磷处于较丰富水平(图 3e)。全磷变化范围 S 样地 2.30~2.66 g/kg,G 样地 1.64~2.06 g/kg,T 样地 1.63~2.18 g/kg。

各样地基材土壤速效磷呈现波动变化(图 3f)。S 样地速效磷 2007、2009 年异常丰富,均在 300 mg/kg 以上,其余年度为 36.23~154.29 mg/kg,总体处于丰富水平。G 样地、T 样地速效磷变化规律与 S 样地类似。

速效钾是植物根系吸收的直接钾素供给源,是土壤钾素的现实供应指标。随着恢复年数增加,G 样地速效钾水平高、波动幅度大,波动范围在 59.87~207.03 mg/kg;相比而言,S 样地、T 样地波动幅度较小,2 个样地的速效钾水平在监测期间总体处于丰富水平,仅 2012 年度 T 样地出现较大波动(图 3g)。

此外,对比发现,速效钾变化趋势与有机质含量变化相似,其原因在于土壤有机质具有改善土壤理化性质、增强土壤缓冲能力的作用(潘树林和辜彬,2013)。当基材土壤有机质分解时,产生的有机酸可以促进土壤总矿质养分的溶解,抑制难溶性的沉淀产生,减少交换钾的固定,从而使速效钾的含量增加。

3.2 基材土壤综合肥力

根据基材土壤肥力因子及其评价标准,采用训练好的 T-S 模糊神经网络,得到基材土壤综合肥力指数如图 4。可根据综合肥力指数对基材土壤肥力进行定量与定性的评价。综合肥力指数越小,肥力状况就越好,越有利于植被生长。

计算结果显示,各样地综合肥力指数随着监测时间的推移,总体是逐渐减小趋于稳定的,S 样地综合肥力指数处于 3.14~2.69,G 样地综合肥力指数处于 3.25~2.73,T 样地综合肥力指数处于 3.47~2.74。各样地均处于中等向上肥力水平。

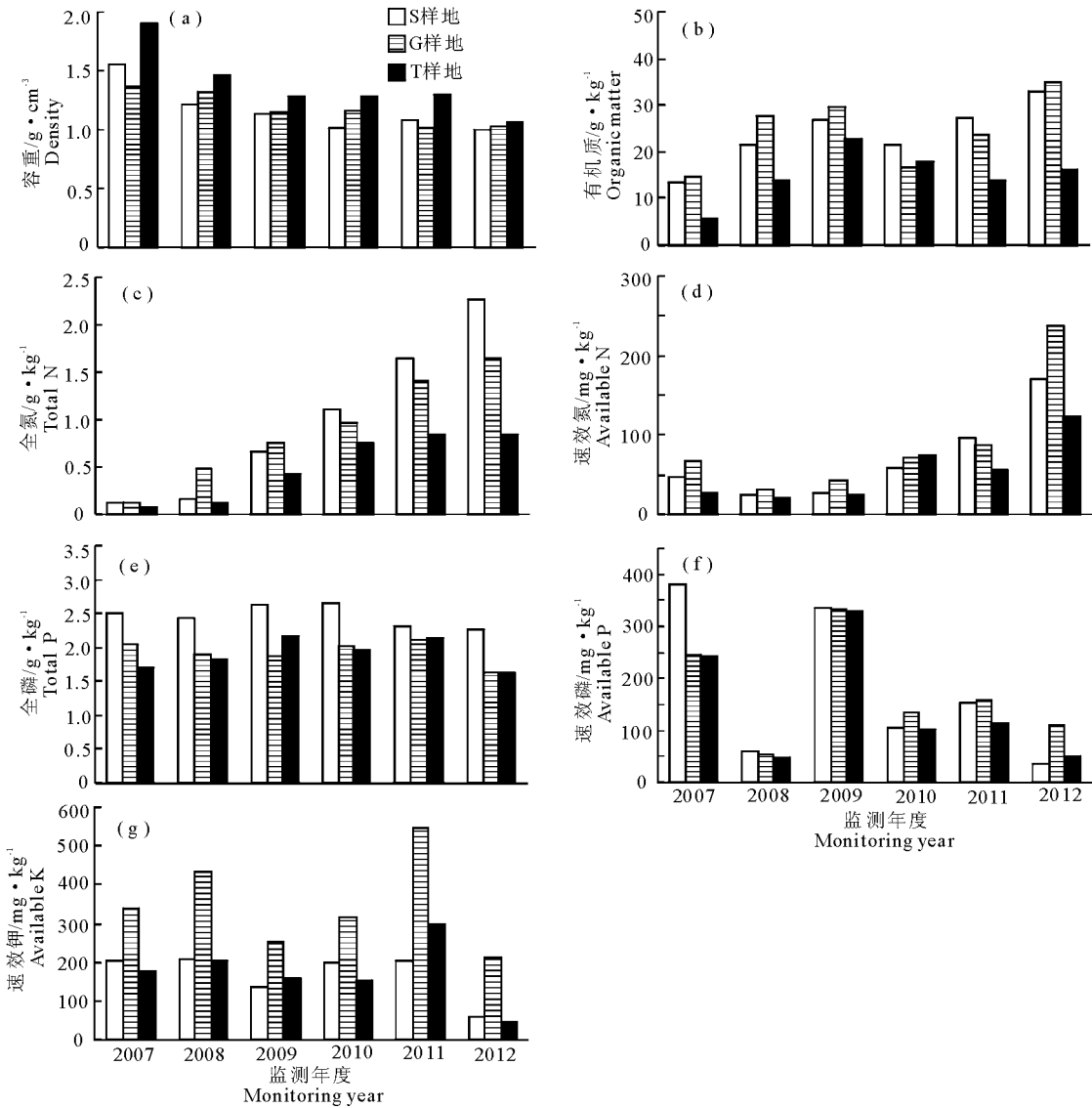


图3 基材土壤肥力因子监测结果

Fig. 3 Substrate soil fertility factors for each plot by year

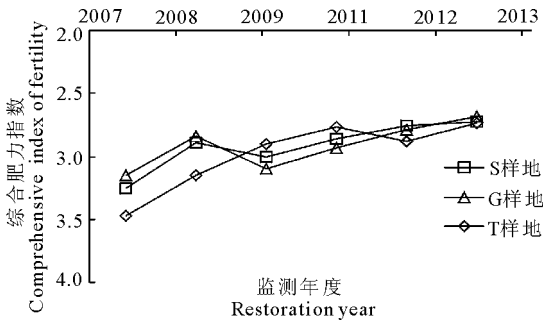


图4 各样地基材土壤肥力综合指数

Fig. 4 Variation of the comprehensive index of substrate soil fertility for each sampling site

4 讨论

4.1 基材土壤肥力与配置关系

根据各样地基材土壤肥力因子长期监测结果和

肥力因子评价标准,基材土壤容重随着边坡恢复年数的增加,呈逐渐降低趋势,逐渐向天然耕植土过渡。这表明基材实施后,在天然条件下,土壤结构能够较好地自然演替,同时基材配置中,特别是水泥的配置较为合理。基材土壤有机质处于缺乏水平,虽然基材配置中添加了适量的有机物料,但其转化效率不足。从提升基材土壤肥力角度,为提高有机质含量,除了添加更为高效的有机物料提高其转化率外,可通过微生物改善生化特性,例如添加活化酶。基材土壤的全氮和全磷总体上处于丰富水平,植被可以直接吸收利用的速效氮、磷、钾素,出现波动变化,比例并不充足,从提升基材土壤肥力角度,可进一步对基材进行活化。

4.2 基材土壤肥力演替

根据 S 样地相同配比的植被混凝土生态修复边

坡早期监测数据,将其结果作为 S 样地的初期综合肥力指数,结合 3 个样地 T-S 模糊神经网络模型计算结果,得到基材土壤综合肥力在不同时间的演替规律(图 5)。基材土壤肥力在初期变化较快,3~4 年后基材土壤肥力得到明显改善,当恢复时间达到 7~8 年及以后,基材土壤综合肥力达到中等向上水平并处于较稳定的状态。从植被长势情况看,基材土壤肥力在此水平均适合植被的生长。

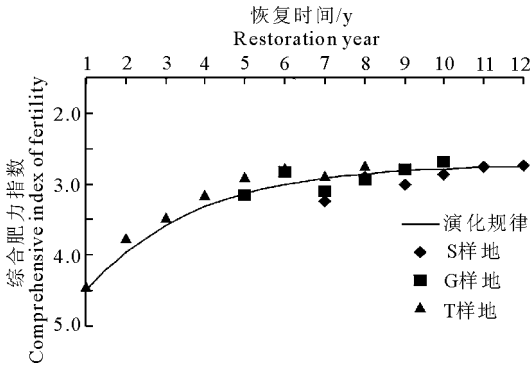


图 5 基材土壤肥力综合指数与恢复时间关系
Fig. 5 Relationship between comprehensive index of substrate soil fertility and restoration time

植被混凝土生态修复边坡在植被演替过程中,土壤容重呈下降的趋势,土壤速效氮、全氮呈上升趋势,有机质、有效钾、速效磷、全磷呈现波动变化。总体来说,各样地综合肥力水平呈现先增长后稳定的发展趋势,肥力综合等级处于中等向上水平,表明了植被混凝土基材肥力的持久性;T-S 模糊神经网络评价肥力等级与边坡实际情况相符合,说明了 T-S 模糊神经网络评价的有效性与适用性。

参考文献

白军红,王庆改,丁秋祎,等,2008. 不同芦苇沼泽湿地土壤全氮季节性变化和氮储量研究(简报)[J]. 草业科学,17(2): 162-165.

牛海波,许文年,夏振尧,等,2010. 植被混凝土肥力水平变化研究[J]. 中国水土保持,(2): 36-39.

潘树林,辜彬,2013. 深圳盐田港公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性的研究[J]. 土壤,45(2): 366-372.

孙增圻,徐红兵,1997. 基于 T S 模型的模糊神经网络[J]. 清华大学学报(自然科学版),37(3): 76-80.

王志泰,包玉,李毅,2012. 石质边坡植被建植两周年群落特征与土壤养分动态[J]. 草业学报,21(2): 34-42.

王志泰,李毅,王志杰,2012. 岩石边坡植被建植初期植被特征与土壤养分动态[J]. 农业工程学报,28(2): 215-221.

吴彬,刘刚,肖海,等,2014. 雅砻江官地水电站生态护坡工程初期土壤肥力状况[J]. 水土保持通报,34(2): 172-176.

夏振尧,许文年,王乐华,2011. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J]. 岩土力学,32(6): 1719-1724.

许文年,夏振尧,周明涛,等,2012. 植被混凝土生态防护技术理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社: 141-157.

许阳,陈芳清,金章利,等,2012. 水电站植被混凝土边坡生态防护工程基材土壤肥力隔年变化分析[J]. 水利水电科学,43(11): 47-50.

张宇,卢文喜,陈社明,等,2012. 基于 T S 模糊神经网络的地下水水质评价[J]. 节水灌溉,(7): 35-38.

章家恩,2006. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京:化学工业出版社: 218-232.

赵自超,夏振尧,熊诗源,等,2013. 扰动边坡植被恢复过程中的土壤性质演变[J]. 水土保持通报,33(5): 82-86.

周明涛,许文年,夏栋,2010. 向家坝水电站工程扰动区不同类型边坡土壤酸碱度与肥力分析[J]. 应用生态学报,21(4): 1031-1037.

Bhojvaid P P, Timmer V R,1998. Soil dynamics in an age sequences of prosopis juliflora planted for sodic soil restoration in India [J]. Forest Ecology and Management, 106(2): 181-193.

Joel M, Jennifer L, 2010. Shifting microbial community structure across a marine terrace grassland chronosequence, Santa Cruz, California [J]. Soil Biology and Biochemistry, 42(1): 21-31.

(责任编辑 张俊友)

Soil Fertility Dynamics of Substrate Used for Ecological Slope Protection

DING Yu^{1,2}, HU Wen-jing¹, XIA Zhen-yao^{1,2}, LI Bo¹, YAO Xiao-yue³, XU Wen-nian³

- (1. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, P. R. China;
2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, P. R. China;
3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, P. R. China)

Abstract: Analysis of substrate soil fertility during the process of vegetation restoration provides a scientific basis for improving substrate soil performance and the vegetation concrete technique used for ecological restoration. In this study, we analyzed substrate soil fertility on three slopes where vegetated concrete was used for ecological restoration: a slope on the Shuibuya Power Station highway on Qingjiang River (Plot S, established April, 2000), a slope on the Gaobazhou power station highway (Plot G, established March, 2002) and the slope behind the library of China Three Gorges University in Yichang city, Hubei Province (Plot T, established March, 2004). Soil samples were collected at a depth of 5 – 10 cm using the cutting ring method and the major fertility factors were determined annually from 2007 to 2012. The substrate soil fertility was evaluated using a T-S fuzzy neural network and the dynamics and succession of substrate soil fertility were analyzed. The substrates used at the three experimental plots were of similar composition: For Plots S and T, the soil:concrete:organic matter: additive ratio was 100 : 7.8 : 5 : 4.6 and, for Plot G, the ratio was 100 : 8 : 5 : 5. From 2007 to 2012, the fertility factors of the soils were determined annually, including soil bulk density, organic matter, available nitrogen, total nitrogen, available phosphorus, total phosphorus and available potassium. Soil organic matter increased from 13.34 g/kg to 32.89 g/kg in Plot S, from 14.78 g/kg to 35.02 g/kg in Plot G and, with fluctuation, from 5.65 to 22.87 g/kg in Plot T. In the same order of experimental plots (S, G, T), total nitrogen ranges were 0.12 – 2.27 g/kg, 0.13 – 1.64 g/kg and 0.08 – 0.84 g/kg, while available nitrogen ranges were 23.94 – 170.87 mg/kg, 31.70 – 237.51 mg/kg, 20.88 – 122.28 mg/kg and total phosphorus ranges were 2.30 – 2.66 g/kg, 1.64 – 2.06 g/kg, and 1.63 – 2.18 g/kg. Rapidly available phosphorus in all three plots was unusually high in 2007 and 2009, especially for Plot S (>300 mg/kg) and averaged 36.23 – 154.29 mg/kg in other years. Available potassium was adequate in all plots, fluctuating from 59.87 to 207.03 mg/kg in Plot G and within smaller ranges in Plots S and T. The comprehensive index of substrate soil fertility calculated using the T-S fuzzy neural network model was 3.14 – 2.69 for Plot S, 3.25 – 2.73 for Plot G and 3.47 – 2.74 for Plot T. During the vegetated concrete ecological restoration, soil bulk density tended to decrease, available and total nitrogen tended to increase, and organic matter, available potassium, and available and total phosphorus fluctuated. The comprehensive fertility of the three slopes increased initially and then stabilized at an adequate level. The comprehensive fertility level evaluation using the T : S fuzzy neural network model was consistent with observed slope conditions, indicating that the T-S fuzzy neural network model effectively predicts the results of ecological slope restoration using vegetated concrete.

Key words: slope protection; ecological substrate; soil fertility; dynamic change; T : S fuzzy neural network