

不同基材边坡土壤肥力变化趋势预测

——以向家坝水电站工程区为例

周明涛^{1,2}, 胡旭东², 许文年^{1,2}

(1. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: [目的] 对向家坝水电站工程区 7 种不同基材边坡土壤在 2005—2014 年的肥力进行测定和分析, 并预测未来肥力变化趋势, 旨在为大型水利水电工程区边坡植被重建及生态恢复提供理论与技术支撑。[方法] 运用灰色理论研究各肥力因子间的灰色关联度, 以此确立主要肥力因子来表征土壤肥力, 而后建立 Logistic 预测模型探讨土壤肥力未来 25 a 的变化情况。[结果] 微生物量与其他肥力因子间的灰色关联度均大于其他肥力因子相互之间的灰色关联度, 可作为主要肥力因子来表征土壤的肥力水平; 2005—2040 年上述边坡土壤微生物量(肥力水平)总体表现为: 天然林 > 天然次生林 > 植被混凝土边坡 > 厚层基材 > 框格梁回填土 > 客土喷播 > 弃渣地。[结论] 随着时间的推移, 各边坡土壤的微生物量(肥力水平)将最终趋向稳定, 在人工营造的边坡植被生境中, 植被混凝土边坡的土壤肥力表现最佳。

关键词: 灰色理论; 灰色关联度; Logistic 预测模型; 土壤肥力因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0107-06

中图分类号: S158.2, X829

文献参数: 周明涛, 胡旭东, 许文年. 不同基材边坡土壤肥力变化趋势预测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 107-111. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.019

Trend Prediction of Soil Fertility of Various Substrate Slopes

— A Case Study of Xiangjiaba Hydropower Project Area

ZHOU Mingtao^{1,2}, HU Xudong², XU Wennian^{1,2}

(1. *Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges*

Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] Soil fertilities of seven substrate slopes in Xiangjiaba hydropower project area were measured in the years from 2005 to 2014. The changing trend of soil fertility was predicted to provide theoretical and technical support for slope vegetation restoration in large water conservancy and hydropower project. [Methods] Grey theory and logistic equation were integrated to establish a structurally sound and high-precision logistic model for forecasting the future trend of main soil fertility. The main soil fertility was decided by Grey correlation degree among various soil fertility factors in different slopes. [Results] Grey correlation degrees between microbial biomass and other fertility factors were all larger than the ones among other fertility factors, and thereby the soil microbial biomass can be regarded as the main soil fertility factor and denote the soil fertility level. Soil fertilities indicated by microbial biomass were predicted having an overall order in 2005—2040 that is natural forest(NF) > natural secondary forest(NSF) > vegetation-growing concrete gunning(VGCG) > thick layer substrate(TLS) > framed beams and soil covered(FBSC) > external-soil spray seeding(ESS) > discarded residue(DR). [Conclusion] Soil microbial biomass on different substrate slopes will eventually get stable with the time pass by. The VGCG slope's fertility level is the best.

Keywords: grey theory; grey correlation degree; logistic predictive modelling; soil fertility factors

收稿日期: 2015-09-29

修回日期: 2015-11-10

资助项目: 十二五国家科技支撑计划项目“金沙江梯级水电开发区生态保护与入库泥沙调控关键技术与示范”(2012BAC06B02)

第一作者: 周明涛(1979—), 男(汉族), 湖北省保康县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为边坡生态防护及植被修复技术。E-mail: zmt@ctgu.edu.cn。

土壤生态系统中存在着大量的微生物群落,它们是有有机质、腐殖质的分解者,可降解植物难以吸收的化合物,并将其转化为植被生长必需的营养元素,在土壤养分转化、循环以及生化过程中担任着不可或缺的角色,是土壤养分最重要的“源”和“汇”,亦是衡量土壤肥力的重要指标之一^[1-5]。大型水利水电工程的兴建给社会带来巨大经济效益的同时,也对工程区的自然环境造成了严重的干扰,并引起一系列生态问题,如岩质边坡裸露、土壤肥力退化、植被毁损、生物多样性丧失、生态系统崩溃等^[6]。众多裸露边坡缺乏植物生长必备的土壤环境,常需人工营造植被生境,以加快生态恢复的进程。边坡植被生境的营造,常用方法有液压喷播法、植被混凝土生态修复技术、厚层基材喷播绿化技术等。各方法的实质均是以种植土为主,辅以不同黏结剂、添加剂等材料,由此形成植被生境。针对人造边坡植被生境,当前研究的一个主要方向便是土壤肥力,如赵娟等^[7]综合探讨了不同生态修复技术的边坡基材及天然林土壤肥力与土壤酶活性的相互关系;吴彬等^[8]以雅砻江官地水电站生态修复工程为例,对种植槽客土回填植草技术和植被混凝土生态修复技术在应用初期土壤的肥力状况进行了研究。众多研究极大的丰富了边坡植被生境基础理论,完善了边坡生态恢复技术体系。然而,在人造植被生境中,许多营养物质需要微生物群落分解后才能被植物吸收利用,可至今却未见微生物群落对土壤肥力的影响及其与土壤肥力之间关系的研究报道。同时,水电站工程区边坡的生态修复是一个长期过程,而研究者此前大都停留在对土壤肥力现状的探讨,较少涉及变化趋势的分析与预测。为此,本研究以向家坝水电站工程区的框格梁回填土(FBSC)、植被混凝土(VGCG)、厚层基材(TLS)、客土喷播(ESS)、天然林(NF)、天然次生林(NSF)和弃渣地(DR)7种不同基材的边坡土壤为研究对象,利用灰色理论中的关联度分析法确立出肥力主因子(微生物量),而后采用灰色建模法建立 Logistic 预测模型,并探讨土壤肥力(微生物量)演替状况,旨在为大型水利水电工程区边坡植被重建及生态恢复提供理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

向家坝水电站位于云南与四川两省交界的金沙江下游河段,是金沙江水电基地最后一级水电站,地理坐标 28°22'15"—28°39'16"N,104°3'27"—104°25'25"E,主体工程于 2004 年竣工。该区为典型的干热河谷地段,干湿季分明,最高气温 38.3℃,最低气温 -1.0℃,年均气温 21~23℃;年均降雨量约 896.2 mm,其中

6—11 月降雨量占全年降雨量的 90%以上;年均相对湿度 81%左右;年日照时数 2 200 h 左右。弃渣地边坡为工程建设弃土废石渣坡地,其土、石体积比约为 1:9,2004 年初人工堆埋而成;厚层基材边坡 2005 年施工,边坡土壤为种植土、腐殖质、高分子胶粘剂及复合肥等的混合物^[9];框格梁回填土边坡 2004 年施工,边坡土壤为单一的种植土;客土喷播边坡 2004 年施工,边坡土壤为种植土、腐殖质及复合肥的混合物^[10];植被混凝土边坡 2005 年施工,边坡土壤为种植土、腐殖质、水泥、混凝土绿化添加剂的混合物^[11]。施工时,种植土均开挖自同一土料场。

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法 自 2005 年起,连续 10 a 对向家坝水电站工程区框格梁回填土边坡、植被混凝土边坡、厚层基材边坡、客土喷播边坡、天然林边坡、天然次生林边坡和弃渣地边坡的土壤进行取样分析。由于 6—11 月降雨量占全年降雨量的 90%以上,所以取样时间选取在每年的 11 月份。每种边坡分别设置 5 个样方,单个样方内用交叉对角线 5 点式布点,共 25 个布设点,在各布设点用直径 4 cm 的地质钻取距离坡面 4—10 cm 处的土壤样品各 10 钻。取样时,除去表面杂质和动植物残体,相同布设点处取出的土样组成一个混合样,统一编号。混合样及时带回室内风干、磨细、过筛,装入磨口瓶中备用。各样品指标测定均在 7 d 内完成。

1.2.2 肥力因子选取与测定方法^[12] 选取微生物量、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾为土壤肥力因子。微生物量测定采用氯仿熏蒸培养法—硫酸钾(K₂SO₄)提取法;有机质采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)容量法—外加热法;碱解氮采用扩散吸收法;速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠(NaHCO₃)溶液浸提—钼锑抗比色法;速效钾 1 mol/L 中性乙酸铵(CH₃COONH₄)溶液浸提—火焰光度法。

1.2.3 肥力主因子确立与预测模型建立 利用灰色理论中的关联度分析法确立肥力主因子,而后采用灰色建模法建立 Logistic 预测模型。灰色理论中关联度分析法思路明确,可以在很大程度上减少由于信息不对称带来的损失,并且对数据要求较低,工作量较少^[13];灰色建模法是将一些已知的数据序列,通过累加、累减等方式的处理,使其由散乱状态转向规律化,然后利用微分方程拟合,并进行外延计算,其结果精度高,所需数据少^[14];Logistic 方程是研究有限空间内生物种群增长规律的重要数学模型,自 1938 年由荷兰数学生物学家 Verhulst 提出以来至今,一直被生态学家用来模拟、描述各种生物演替过程,并在相关领域得到广泛应用^[15-16]。

1.2.4 数据处理 原始数据经 Excel 整理后,采用 SPSS 统计分析软件中的无量纲标准差和 Turkey's-b 检验处理,由 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 灰色关联度

对向家坝水电站工程区 7 种不同基材边坡土壤

$$\xi_{0i}(k) = \frac{[\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|]}{[|x_0(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|]}$$

式中: x_0 ——参考数列; x_i ——比较数列; $\xi_{0i}(k)$ ——第 k 个时刻比较曲线 x_i 参考曲线 x_0 的相对差值,即 x_i 对 x_0 在 k 时刻的关联系数;

灰色关联度计算,计算公式采用非平权法:

$$\gamma_{0i} = \sum_{k=1}^n a(k) \cdot \xi_{0i}(k)$$

式中: γ_{0i} ——灰色关联度; $a(k)$ ——各指标的权值,

样品进行土壤微生物量、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾数据收集。对数据进行无量纲标准化,再以其中一种肥力因子作为参考数列,设为 x_0 ;其他 4 种肥力因子作为比较数列,设为 x_i ,其中 $i=1,2,3,4$ 。计算 x_i 各对应点的绝对差值 $|x_0(k) - x_i(k)|$,找出两级最小差 $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 和最大差 $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$,然后计算关联系数 $\xi_i(k)$;

$$\sum_{k=1}^n a(k) = 1.$$

以植被混凝土边坡为例,其 10 a 的肥力监测数据详见表 1。

利用上述公式对监测的数据进行灰色关联度分析,得出其土壤中各肥力因子间的关联度,分析结果详见表 2。

表 1 植被混凝土边坡土壤中各肥力因子 10 a 的监测数据

植被混凝土	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2010 年
微生物量/(g · cm ⁻²)	192.4	203.8	226	261.7	297.5	362.5	336.8	342.5	452.6	484.6
有机质/(g · kg ⁻¹)	3.7	5.3	6.5	8.5	10.2	18.3	21.0	16.2	20.0	22.2
碱解氮/(mg · kg ⁻¹)	37.0	44.4	47.4	55.5	62.3	60.4	49.3	57.8	60.5	63.3
速效磷/(mg · kg ⁻¹)	7.6	12.8	16.7	24.0	28.1	48.1	56.4	39.9	86.4	85.9
速效钾/(mg · kg ⁻¹)	31.5	82.5	135.5	197.3	220.1	426.6	589.9	262.8	347.5	347.5

表 2 植被混凝土边坡土壤中各肥力因子的灰色关联度

肥力因子	微生物量	有机质	碱解氮	速效磷	速效钾
微生物量	1.000				
有机质	0.883	1.000			
碱解氮	0.790	0.574	1.000		
速效磷	0.913	0.514	0.345	1.000	
速效钾	0.814	0.537	0.271	0.345	1.000

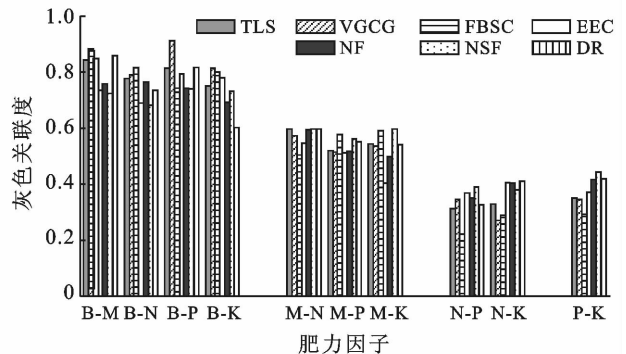
采用相同方法分析,得出 7 种类型边坡土壤中各肥力因子间的灰色关联度(图 1)。由图 1 可知,微生物量与其他肥力因子间的灰色关联度均普遍大于其他肥力因子相互之间的灰色关联度。表明在向家坝水电站工程区 7 种不同基材边坡中,微生物量是土壤肥力主因子,其含量的优良状况可直接反应有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的含量,从而表征土壤肥力状况。因此,本研究选取微生物量作为衡量土壤肥力的指标,并以其来预测向家坝水电工程区 7 种不同边坡基材土壤肥力的变化趋势。

2.2 Logistic 预测模型

2.2.1 Logistic 方程 Logistic 方程形式为:

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = r \left(1 - \frac{N}{N_{\max}} \right)$$

式中: N ——种群中的生物数量; r ——正常数,代表自然增长的能力,也称为自然增长率; N_{\max} ——在有有限生存资源条件下维持种群生存的最大数量。



注:图中 B, M, N, P 和 K 分别表示微生物量、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾; B-M 表示微生物量与有机质之间的灰色关联度,依次类推。

图 1 不同基材边坡土壤中各肥力因子间的灰色关联度

本研究测定的微生物含量为质量浓度,故用质量浓度 C 代替生物数量 N ,则有方程:

$$\frac{1}{C} \frac{dC}{dt} = r \left(1 - \frac{C}{C_{\max}} \right)$$

对方程求解得:

$$C = \frac{C_{\max}}{1 + \left(\frac{C_{\max}}{C_0} - 1\right)e^{-r(t-t_0)}}$$

$$\text{令 } \alpha = \left(\frac{C_{\max}}{C_0} - 1\right)e^{r\sigma_0},$$

$$\text{则 } C = \frac{C_{\max}}{1 + \alpha e^{-r\sigma}}$$

式中: C_0, t_0 ——初始条件; C_{\max} ——最大质量浓度。

2.2.2 灰色建模法 灰色建模法先将 Logistic 方程变成灰色系统理论中 GM(1,1)模型的形式:

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} + \lambda y^{(1)} = \mu$$

然后再利用灰色系统理论中的相关定理求解其相关参数。

首先对 Logistic 方程进行变形,令

$$C = \frac{1}{y}, \text{ 代入 } \frac{1}{C} \frac{dC}{dt} = r \left(1 - \frac{C}{C_{\max}}\right) \text{ 中得:}$$

$$\frac{dy}{dt} + ry = \frac{r}{C_{\max}}$$

再令 $\lambda = r, \mu = \frac{r}{C_{\max}}$, 则 Logistic 方程可改写成与 G(1,1)模型相同的形式:

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} + \lambda y^{(1)} = \mu$$

依据灰色理论中的建模理论,可以得到参数(λ, μ)须满足下列关系式:

$$\text{式中: } y = \begin{pmatrix} -0.5(y_1 + y_2) & 1 \\ -0.5(y_2 + y_3) & 1 \\ \Lambda & \Lambda \\ -0.5(y_{n-1} + y_n) & 1 \end{pmatrix},$$

$$Y = \left(\begin{array}{cc|c} y_2 - y_1 & y_3 - y_2 & \Lambda \\ t_2 - t_1 & t_3 - t_2 & \Lambda \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ y_n - y_{n-1} & & \Lambda \end{array} \right) T;$$

由上式求出参数(λ, μ),可计算出 r, C_{\max} ,从而建立 Logistic 预测模型。

为了使 Logistic 预测模型更加精确,需进行参数的修正。考虑到任一时刻 t 与相应的微生物质量浓度 $C(t)$ 都对结果 α 产生影响,依据监测数据分别选取全局求和平均或局部求和平均的方法计算 α 。

(1) 如果监测数据的散点图有比较明显的 S 形,则令:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{\max}}{C(t_i)} - 1 \right) e^{r\sigma_i}$$

式中: n ——数据点的个数。

(2) 如果数据的散点图是一条比较陡峭的下凹曲线,则令:

$$\alpha = \frac{1}{(n-\beta+1)} \sum_{i=\beta}^n \left(\frac{C_{\max}}{C(t_i)} - 1 \right) e^{r\sigma_i}$$

式中: β ——取值不大于 n 的正整数,因陡峭的程度不同而远离或接近 n 。

(3) 模型检验。以框格梁回填土边坡为例,选取 2005—2009 年微生物量的监测数据进行拟合求解参数;利用 Matlab 作出散点图,得到格梁回填土边坡土壤中微生物量数据的散点图是一条比较陡峭的下凹曲线,故选取

$$\alpha = \frac{1}{(n-\beta+1)} \sum_{i=\beta}^n \left(\frac{C_{\max}}{C(t_i)} - 1 \right) e^{r\sigma_i}$$

由 Matlab 程序计算(计算中时间 t 的取值为 $t = 1, 2, \dots, 5$, 其 $t=1$ 时代表 2005 年,以此类推得:

$$r = 0.2546, C_{\max} = 405.4761$$

同时经过数次模拟得出 β 取 5 时拟合效果最佳,得出 $\alpha = 4.53$ 。则框格梁回填土微生物量的 Logistic 预测模型为:

$$C = \frac{405.4761}{1 + 4.53e^{-0.2146t}}$$

利用上述模型对 2010—2014 年框格梁回填土边坡土壤微生物量进行预测,同时采用 $\alpha = \left(\frac{C_{\max}}{C_0} - 1\right)e^{r\sigma_0}$ 公式计算得 $\alpha = 2.46$,与局部求和平均方法进行对比分析,结果详见表 3。由表 3 中监测值和预测值对比可见,预测结果精度高,其中 2013 和 2014 年的预测准确度接近 100%,由此可得,灰色建模法建立的 Logistic 预测模型对向家坝水电站工程区边坡的土壤微生物量进行预测的方法是可行的。

表 3 2010—2014 年框格梁回填土边坡土壤中微生物量的监测值与预测值

年份	监测值/ (g · cm ⁻³)	预测值/ (g · cm ⁻³)	精度/%
2010	172.5	180.2	81.5
2011	220.5	201.9	95.7
2012	177.8	223.6	56.7
2013	277.1	244.8	99.6
2014	299.8	265.1	99.8

2.3 不同基材边坡土壤肥力预测

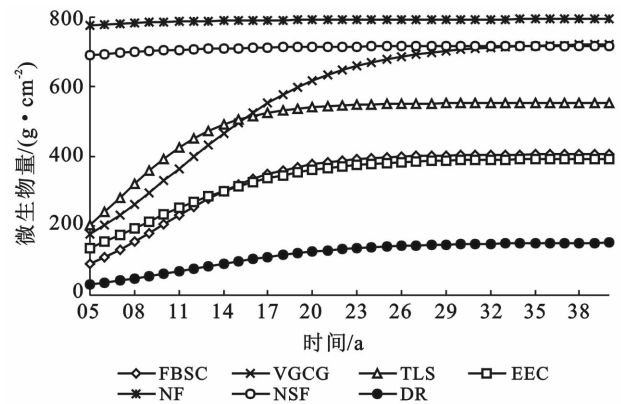
用 Logistic 预测模型对向家坝水电站工程区 7 种不同基材边坡土壤微生物量进行预测,采用上述相同的方法对其他 6 种不同基材边坡土壤微生物量 Logistic 预测模型的参数进行求解,结果如图 2 所示。图 2 中 2005—2015 年数据为监测值,2016—2040 年数据为 Logistic 模型预测值,其中黑点代表各基材边坡土壤中微生物量初次达到增长上限时所对应的坐标,即天然林和天然次生林边坡土壤微生物量在 2020 年分别达到最大值 794.1 和 718 g/cm²,植被混

凝土边坡土壤微生物量在2037年达到最大值724.7 g/cm²,厚层基材边坡土壤微生物量在2024年达到最大值552.9 g/cm²,框格梁回填土边坡土壤微生物量在2026年达到最大值405.5 g/cm²,客土喷播边坡土壤微生物量在2028年达到最大值398.7 g/cm²,弃渣地边坡土壤微生物量在2030年达到最大值151.5 g/cm²。

从图2可知,2005—2040年向家坝水电站工程区7种不同基材边坡土壤微生物量总体表现为:天然林>天然次生林>植被混凝土边坡>厚层基材>框格梁回填土>客土喷播>弃渣地。天然林和天然次生林植被自然演替时间久,已适应当地环境气候,并形成稳定健全的生态关系,同时地表累积的凋落物丰富,为微生物提供充裕的物质来源,故其土壤微生物量远高于人工修复边坡和弃渣地。弃渣地长期处于荒废,大部分为裸露的岩质坡面,植被难以生存,故其土壤微生物量远低于其他边坡。除框格梁回填土边坡外,其他人工修复边坡的基材中均掺入了有机质或腐殖质,从而为微生物的生长和发育提供了适宜的环境空间,因此框格梁回填土边坡初期土壤微生物量低于其他人工修复边坡。向家坝地处干热河谷地段,干湿季分明,降雨量大且为酸雨,导致土壤流失严重并呈现一定的酸性,植被混凝土边坡中掺入水泥达到固土保肥的作用,同时加入绿化添加剂中和其碱性,为微生物和植被提供适宜的环境空间,因此微生物量在所有人工修复边坡中最高,边坡的恢复效果最佳。然而,植被混凝土边坡中掺入水泥对土壤微生物量达到稳定水平有一定的干扰,相比其他人工修复边坡,植被混凝土边坡土壤微生物量达到稳定时间最长,因为水泥完全被降解需要一定的时间。相较于植被混凝土边坡,厚层基材边坡土壤呈现酸性,抑制了大部分微生物的生长与发育;相较于客土喷播边坡,厚层基材边坡中掺入了高分子胶黏剂,提高边坡稳定性且降低水土流失,达到了固土保肥作用,故其微生物量远大于客土喷播边坡,而略低于植被混凝土边坡。厚层基材边坡初期掺入了复合肥,故其微生物量在初期高于框格梁回填土边坡,缺点在于雨季时水土流失严重,导致未来趋势低于结构稳定的框格梁回填土边坡。综合情况表明,作为人工营造的边坡植被生境,植被混凝土边坡技术恢复效果最好,该技术值得推广与应用。

从图2各曲线的趋势可知,2005—2020年向家坝水电站工程区中,天然林和天然次生林边坡已演替若干年,土壤微生物早已与植被构成稳定健全的共生关系,且达到了生态平衡,故其变化稳定。其他5种人工修复边坡中土壤微生物量(肥力水平)均呈逐年

增长的趋势,其中植被混凝土边坡土壤肥力水平增长曲率最高,其次为厚层基材边坡,主要是施工时其原材料中配备有较多量的复合肥和腐殖质,复合肥直接提高了土壤肥力,腐殖质为微生物生存提供了较适宜的环境空间,因而微生物增长最快。2020—2040年各边坡土壤微生物量(肥力水平)均趋于稳定,主要是由于资源、空间有限,生命不断更替,微生物种群、植物种群和其他各种种群间形成稳定的物质与能量循环,从而最终趋于稳定。情况表明人工营造边坡植被生境时,若提供足量可供植物生长的土壤和养分,其肥力状况均将趋向于良性发展,并最终达到生态平衡,实现人与自然间的和谐。



注:FBSC 框格梁回填土; VGCG 植被混凝土; TLS 厚层基材; ESS 客土喷播; NF 天然林; NSF 天然次生林; DR 弃渣地。

图2 不同基材边坡土壤微生物量 Logistic 模型预测结果

3 结论

在向家坝水电站工程区7种不同基材边坡土壤中,微生物量与其他肥力因子间的灰色关联度均大于其他肥力因子相互之间的灰色关联度,微生物量可作为主要肥力因子,其大小可表征土壤肥力水平的高低。由于资源与空间的限制,微生物量(肥力水平)均将在某一特定时段达到最大值,并随着时间推移最终趋向稳定。在2005—2040年,向家坝水电站工程区7种不同基材边坡土壤的微生物量(肥力水平)依次表现为:天然林>天然次生林>植被混凝土边坡>厚层基材>框格梁回填土>客土喷播>弃渣地,表明植被混凝土边坡的恢复效果最佳,该方法值得推广与应用。

[参考文献]

- [1] 焦晓光,高崇升,隋跃宇,等.不同有机质含量农田土壤微生物生态特征[J].中国农业科学,2011,44(18):3759-3767.

- 土地生态敏感性评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1180-1188.
- [2] 史培军, 江源, 王静爱. 土地利用覆被变化与生态安全响应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 沈清基, 徐溯源, 刘立耘, 等. 城市生态敏感区评价的新探索: 以常州市宋剑湖地区为例[J]. 城市规划学刊, 2011(1): 58-66.
- [4] 吴克宁, 韩春建, 冯新伟, 等. 基于 3S 技术的土地生态敏感性分区研究[J]. 土壤, 2008, 40(2): 293-298.
- [5] 史小惠. 榆林地区土地生态敏感性时空动态分析[D]. 陕西 西安: 长安大学, 2013.
- [6] 李军, 曹明明, 邱海军, 等. 基于 GIS 的西安市土地生态环境敏感性评价研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 121-126.
- [7] 杨月圆, 王金亮, 杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2253-2260.
- [8] 帅红, 李景保. 南方小型矿业城镇土地生态敏感性评价: 以湖南省桂阳县为例[J]. 热带地理, 2010, 30(3): 323-236.
- [9] 颜磊, 许学工, 谢正磊, 等. 北京市域生态敏感性综合评价[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3117-3125.
- [10] 吴剑, 陈鹏, 文超祥, 等. 基于探索性空间数据分析的海坛岛土地利用生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2056-2062.
- [11] 潘影, 刘慧慧, 王静, 等. 基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 0529-0537.
- [12] 姚好, 张沛, 严力蛟, 等. 基于 RUSLE 和景观安全格局的土壤侵蚀风险格局研究: 以甘肃省甘南藏族自治州迭部县为例[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 161-167.
- [13] 许妍, 高俊峰, 赵家虎. 基于 GIS 的太湖流域主要生态风险源危险度综合评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3): 335-343.
- [14] A. Ugur Ozcan, Gunay Erpul, Mustafa Basaran, et al. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass-Cankiri, Turkey [J]. Environmental Geology, 2008, 53(8): 1731-1741.
- [15] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨[J]. 亚热带水土保持, 1989(2): 58-60.
- [16] 吕喜玺, 沈荣明. 土壤可蚀性因子 K 值的初步研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(1): 63-70.
- [17] Hickey R S A, Jankowski P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID. Computers [J]. Environment and Urban Systems, 1994, 18(5): 365-380.
- [18] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1033-1036.
- [19] 黄金良, 洪华生, 张璐平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79.
- [20] 文博, 刘友兆, 夏敏. 基于景观安全格局的农村居民点用地布局优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 181-191.

(上接第 111 页)

- [2] 冯峰, 王辉, 方涛, 等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3): 342-345.
- [3] 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 等. 沙漠腹地咸水滴灌林地土壤养分、微生物量和酶活性的典型相关关系[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1119-1127.
- [4] Schroth G, Sinclair F L. Trees, Crops and Soil Fertility [M]. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [5] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(6): 1282-1285.
- [6] 陈海波, 舒安平, 李芮. 山东省济莱市高速公路生态护坡植被恢复过程分析[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 93-99.
- [7] 赵娟, 许文年, 夏栋, 等. 向家坝工程扰动区不同类型边坡土壤酶与肥力的相关性研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(26): 16043-16045.
- [8] 吴彬, 夏振尧, 杨悦舒, 等. 向家坝工程扰动区不同类型边坡土壤不同形态磷的分布[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(6): 1262-1267.
- [9] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 岩石边坡基质—植被系统的养分循环[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 85-90.
- [10] 章梦涛, 邱金淡, 颜冬. 客土喷播在边坡生态修复与防护中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 10-12.
- [11] 许文年, 夏振尧, 周明涛, 等. 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, 2012.
- [12] 章家恩. 生态学常用试验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [13] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 湖北 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [14] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [15] 阎慧臻. Logistic 模型在人口预测中的应用[J]. 大连工业大学学报, 2008, 27(4): 333-335.
- [16] 胡亦郑, 黄庆棉, 罗勇. Logistic 模型的预测应用两例[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(16): 138-141.