

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.020

基于微生物生态效益的土壤肥力综合评价模型*

杨宁¹ 张荣标¹ 张永春¹ 郭建江¹ 张胜华²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021)

摘要: 提出了一种基于土壤微生物生态效益的土壤肥力综合评价模型。利用微生物作用动力学研究分析土壤微生物对土壤生态养分的直接以及间接生态效应,并在原有非生物评价指标权重结构的基础上,将微生物对肥力的贡献力折算到土壤有效态养分指标的权重上进行权值再分配,从而建立了微生物评价指标权值。划分微生物以及其他因素的评价等级并确定适宜型隶属度函数参数,建立土壤肥力综合模糊评价模型。根据评价结果与作物产量进行相关度分析,结果表明所采用的综合评价结果与小麦的长势和产量的相关度均高于传统方法,体现出较好的评价合理性。

关键词: 土壤微生物 生态效益 综合模糊评价 微生物作用动力学 相关度

中图分类号: S154.36; X825 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0108-05

Soil Fertility Synthesis Evaluation Model Based on Ecological Benefit of Microorganism

Yang Ning¹ Zhang Rongbiao¹ Zhang Yongchun¹ Guo Jianjiang¹ Zhang Shenghua²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: A soil fertility fuzzy evaluation model based on the contribution of microorganism was proposed. The microorganism kinetics were used to analyze the direct and indirect ecological effect on the soil fertility. The contribution of the microorganism was converted to the available nutrient element on the basis of the original non-biological evaluation index weight structure to calculate the weights which the traditional method was difficult to determine. The evaluating grade of the whole factors was divided and the appropriate membership function parameters were determined. The soil fertility fuzzy evaluation model was established. According to the correlation analysis between the evaluation results and the crop productions, it was showed that the correlation coefficient of the evaluation was higher than the traditional methods, which was more reasonable than the other evaluations.

Key words: Soil microorganism Ecological benefit Synthesis fuzzy evaluation Microorganism kinetics Correlation

引言

对耕地土壤肥力进行客观、准确的评价是精准农业 GIS 处方施肥和土壤管理的必要前提,已有相关研究报道^[1~2]。上述评价能够为智能化农机设备

的土地管理提供指导依据,对可持续发展的农业自动化与环境控制研究起到一定的贡献。但是它们均忽略了微生物对作物生长的巨大效益^[3~5]。此外,由于评价模型中没有考虑微生物的生态效益,根据传统的评价模型制定的土壤管理措施很容易影响土

收稿日期: 2012-05-15 修回日期: 2012-05-22
* 国家科技部星火计划资助项目(2010GA721005)、福建省农业科技计划重点项目(2011N0038)、江苏省研究生创新基金资助项目(CXLX11_0587)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)(苏政办发[2011]6号)
作者简介: 杨宁, 博士生, 主要从事土壤微生物检测与作用动力学研究, E-mail: yangning7410@163.com
通讯作者: 张荣标, 教授, 博士生导师, 主要从事农业电气化与自动化研究, E-mail: zrb@ujs.edu.cn

壤微生物的菌落结构,减少微生物量,最终影响土壤的肥力^[6]。

因此,本文将土壤微生物对土壤肥力的生态效益纳入到土壤肥力综合评价模型中,建立一种新的土壤肥力综合模糊评价模型。

1 土壤微生物生态效益

1.1 微生物对土壤肥力的直接生态效益

土壤微生物中的固氮菌和磷细菌能够直接将作物无法吸收利用的无效氮、无效磷转化为作物可以直接吸收利用的速效氮和速效磷,起到直接贡献土壤肥力的生态效益。

1.1.1 固氮菌固氮动力学

以小麦为例,土壤微生物中起到固氮作用的主要为联合固氮菌,但由于细菌与植物根系间是一种松散的联合,从微观上看,其固氮作用也很不稳定。但从宏观上来看,土壤中的固氮菌对于作物的固氮作用呈现出一定的稳定性。因此可以根据现有研究成果从宏观上研究联合固氮菌的固氮率问题。文献[7]采用¹⁵N 同位素稀释法对小麦根部联合固氮菌的固氮能力进行测定,一株小麦固氮百分率的计算公式为

$$N = (1 - {}^{15}N_{fs} / {}^{15}N_{nfs}) \times 100\%$$

式中 ¹⁵N_{nfs}——实验样品中¹⁵N 原子百分比

¹⁵N_{fs}——对照样品中¹⁵N 原子百分比

固氮质量比计算公式为

$$N_f = N_t N$$

式中 N_f——固氮质量比,mg/kg

N_t——全氮质量比,mg/kg

研究表明自然状态下(固氮菌生长达到饱和态时)每千克土壤中联合固氮菌固氮质量为 750 mg。

文献[8]通过实验方法研究了一株小麦在自然状态下土壤中的联合固氮菌的分布状况。其中大部分联合固氮杆菌分布于距根系约 1 cm 的土壤(NRS)、根表土壤(RS)和根系表面(RP)处,因此采用最可能计数法(MPN)对三处的菌落状况进行计数。得到 NRS 处根际联合固氮菌为 1.8 × 10⁴ 个/g; RS 处的根际联合固氮菌为 4.2 × 10⁴ 个/g; RP 处的根际联合固氮菌为 7.5 × 10⁶ 个/g。据此通过上述研究,固氮菌在最佳活性状态下的平均固氮质量比计算公式为

$$X = \frac{N_f N_a}{N_{NRS} + N_{RS} + N_{RP}}$$

式中 N_{NRS}、N_{RS}、N_{RP}——该植株的 NRS、RS 和 RP 处的菌个数

N_a——土壤中联合固氮菌的菌个数

1.1.2 磷细菌溶磷动力学

关于磷细菌溶磷、解磷的作用机理,国内外学者已做了广泛研究。已有以作物难以吸收的磷酸钙为底物研究磷细菌的溶磷动力学,并以培养基中的细菌浓度为横坐标,以培养基中的有效磷为纵坐标,通过实验测定得到无效磷转化动力学曲线图。采用数学拟合得到动力学方程^[9]为

$$Y = \mu \lg x + \rho$$

式中 Y——溶磷量 x——细菌浓度

μ——转化常数 ρ——特征常数

经数值拟合,得到无效磷转化动力学方程为

$$Y = 4.54 \lg x + 11.23$$

根据溶磷动力学原理以及磷元素守恒原理,结合磷细菌的分布规律不难得出磷细菌转化的有效磷含量。

1.2 微生物对土壤肥力的间接生态效益

土壤间接生态效益是指土壤微生物不仅对土壤有效态养分有直接贡献,还对同样作为土壤肥力评价指标的土壤有机质、全氮和磷等养分储量指标有间接贡献,从而影响土壤肥力。如:一些土壤微生物虽然不能直接为作物提供氮、磷等营养元素,但是对土壤养分、水分循环、土壤酶活性以及土壤呼吸强度都具有重要影响,通过改善土壤的物理化学性质等来间接影响土壤的肥力^[10]。因此本文将土壤微生物总量对有机质、全氮和全磷等土壤养分储量指标的影响一并纳入综合评价机制。

1.3 微生物评价指标的动态特性

土壤微生物的繁殖活性随季节不同而发生动态变化,研究发现冬季土温低或者土壤处于冰冻状态,微生物繁殖活性低;春季随气温升高,土壤解冻,微生物的繁殖活性开始增强,微生物数量开始增加^[11]。夏、秋季,由于气温较高利于微生物体内的化学溶解机能,致使土壤微生物的繁殖活性和溶解活性都达到了高峰。此时,微生物对土壤肥力的影响达到最大。土壤微生物的数量除了与季节因素相关外还与土壤耕作及管理方式密切相关。在无人为土壤耕作管理措施情况下土壤微生物繁殖活性随季节变化的曲线如图 1 所示。在此基础上,结合微生物作用动力学很容易在图 1 中计算出微生物随季节变化对土壤肥力的贡献作用。

2 土壤肥力评价模型建立

研究区域位于江苏省镇江市丹徒区长岗精细农业试验田内约 1.0 hm² 的麦田(北纬约 32°1 715"、东经约 119°53",海拔高度 286 m)。土壤养分数据的采集和提取工作由江苏大学农业工程研究院完成,

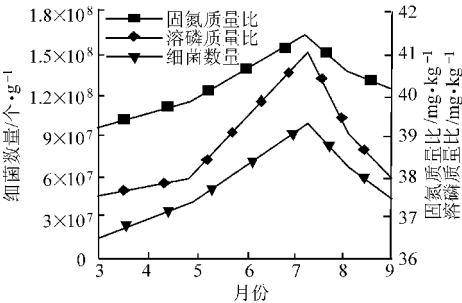


图1 土壤微生物的直接贡献力

Fig.1 Direct contribution of soil microbe

其地域状况以及土壤数据特点参见文献[12]。

2.1 评价指标的确定与权重分配

2.1.1 评价指标的确定

结合文献[13],在确定评价因素集的时候尽量选取其变异量对作物营养吸收和生长状况占主导影响的指标。本文以小麦为研究对象,根据小麦的特性选取速效钾、速效磷、碳酸钙、全磷、全氮、全钾、有机质质量分数以及联合固氮菌和磷细菌、每克土壤的微生物总量(包含细菌、真菌、以及放线菌)10个评价指标为评价因素集。

2.1.2 非微生物指标的初次权重分配

由于生物评价指标与非生物评价指标相互影响,因此生物评价指标的权值难以有效计算。传统综合模糊评价方法中提供了针对非生物指标权值分配方法,因此这里仍然采用传统评价方法的权值分配法则,首先对非生物指标进行权值分配,然后再根据生物指标对非生物指标的影响分析来进行有效的权值折算。这样既没有改变非生物指标的客观权值结构,又成功地将微生物指标的影响引入到综合模糊评价中去。

速效钾、速效磷、碳酸钙、全磷、全氮、全钾、有机质含量等非生物评价指标的权值 $w_1 \sim w_7$ 很容易计算,可以通过取样计算各指标数据的公因子方差占公因子方差总和的比值,将权重值转换为0~1.0的数值,表1所示为这些指标的权值分配结果。

表1 土壤养分指标的权值

Tab.1 Weight of soil nutrient indicators

评价指标	权值
土壤速效钾含量 u_1	0.182
土壤速效磷含量 u_2	0.174
碳酸钙含量 u_3	0.121
全磷含量 u_4	0.116
全氮含量 u_5	0.145
全钾含量 u_6	0.118
有机质含量 u_7	0.144

2.1.3 微生物指标权值的折算

由于土壤中有效态养分是对土壤物理、化学和生物方面的综合体现。有效态营养的分布中含有土

壤微生物评价指标的贡献力,因此,微生物指标的权值可根据1.1和1.2节中土壤微生物对土壤效态养分的贡献力研究,将土壤微生物评价指标的权重从2.1.2节中的土壤效态养分权重中折算出来,进行权重再分配。

对于对土壤有效态营养指标具有直接贡献力的联合固氮菌含量(u_8)和磷细菌含量(u_9)的权值,由于固氮菌和磷细菌同样是生产作物所需的有效氮和有效磷,因此根据1.1节中的细菌作用动力学研究将二者的贡献力折算为速效钾、速效磷对肥力的贡献力来计算权值。其计算方法为

$$w_8 = \frac{Aw_1}{U_1} \tag{6}$$

$$w_9 = \frac{Bw_2}{U_2} \tag{7}$$

其中, A 、 B 为1.3节中的固氮菌与磷细菌随季节变化的有效肥力, U_1 、 U_2 为优质土壤的平均速效氮、磷含量。图2所示为计算得到的土壤固氮菌、磷细菌含量的权值变化曲线。

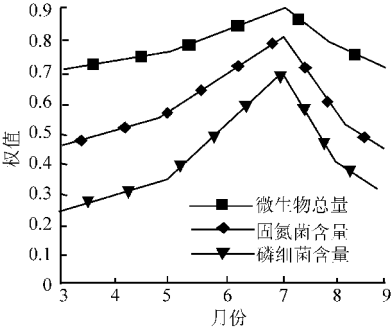


图2 固氮菌和磷细菌含量的权值变化曲线

Fig.2 Weight change of nitrogen-fixing bacteria and phosphorus bacteria

对于整个土壤养分储量指标具有贡献力的土壤中微生物总量(u_{10}),由于它是通过促进土壤养分动态循环、土壤呼吸运动以及酶活性等提升土壤中的有机质、全氮、全磷等土壤养分储量指标进而间接提高土壤综合肥力的,因此对于微生物总量指标的权值,可以通过营养元素初始分布相同情况下,微生物含量对土壤各种营养元素的时间变异量影响来确定分配权值。其计算方法为

$$w_{10} = \sum_{i=1}^7 \frac{w_i \Delta u_i}{u_i} \tag{8}$$

式中 Δu_i 为微生物生态作用致使的作物对评价指标 u_i 的吸收变异影响量,图2为计算得到的权值随季节变化曲线。从图中可以看出土壤微生物总量的权值随季节变化的幅度并不大。其原因是:随着季节的变化土壤微生物群落中细菌、真菌等微生物所起到的肥力贡献作用是此消彼长、相互补充的。

2.1.4 其他指标的权值二次分配

微生物评价指标折算完毕后,需要根据 2.1.3 节的微生物指标折算方法对原先的非生物评价指标权值结构进行二次分配,使得权值之和始终保持为 1。计算方法为

$$w'_i = \begin{cases} w_i - w_{i+7} - \frac{w_i \Delta u_i}{u_i} & (i = 1, 2) \\ w_i - \frac{w_i \Delta u_i}{u_i} & (i = 3, 4, \dots, 7) \end{cases} \quad (9)$$

式中 $w'_1 \sim w'_7$ 为随季节变化的非生物评价指标权值。

2.2 适宜型隶属度函数的确定

联合固氮菌、磷细菌、微生物总量以及有机质含量这些评价指标的肥力效应呈 S 型,即其值越高,表明质量越好,但达到一定临界值之后,也趋于稳定。所以采用 S 型曲线来描述其隶属度函数,即

$$E_i = \begin{cases} 0.1 & (x \leq a) \\ \frac{1}{1 + \alpha(x - a)^{-\beta}} & (a < x < b) \\ 1 & (x \geq b) \end{cases} \quad (10)$$

式中的参数 α, β 由有机质、联合固氮菌、磷细菌和微生物总量的生态效应特点来确定,这里以小麦为研究对象,其 α, β 的取值均为 1。然而其他元素的含量并不是越多越好,如当土壤中全磷量过高时,不能被植物吸收的磷元素则以难溶性磷酸盐的形式存在于土壤中,使土壤盐化和板结。因此全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碳酸钙含量呈现出梯形函数的特点,即在一定范围内,评价对象质量较好,高于或低于该范围则变差,其隶属度函数为

$$E_i = \begin{cases} 0.1 & (x \leq a) \\ \left(\frac{x - a}{b - a}\right)^k & (a < x \leq b) \\ 1 & (b < x < c) \\ \left(\frac{d - x}{d - c}\right)^l & (c \leq x < d) \\ 0.1 & (x \geq d) \end{cases} \quad (11)$$

式中参数 k, l 的取值分别为 2、1。式中分段函数的转折点 a, b, c, d 参考 NY/T309—1996《全国耕地类型区、耕地地力等级划分》^[14] 确定,其参数值分配见表 2。

2.3 综合模糊评价算法实现

根据各指标的权重和隶属度函数,计算土壤综合肥力指数即

$$F = E_i \sum w_i \quad (12)$$

式中 F 为土壤肥力综合指标值,取值为 0 ~ 1 之间,其值越高,表明土壤肥力越好。

表 2 隶属度函数参数取值

参数	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
$u_1/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	50	70	90	130
$u_2/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	40	50	70	100
$u_3/\%$	2.5	5	10	15
$u_4/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	60	110	160	240
$u_5/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.6	1.1	1.5	2.4
$u_6/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	3	6	10	15
$u_7/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	6	9		
$u_8/\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$	5×10^5	1.2×10^6		
$u_9/\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$	3×10^5	9×10^5		
$u_{10}/\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$	7×10^7	1.4×10^8		

3 不同评价方法比较

肥力评价方法的优越性可以从其评价结果的空间变异性和作物长势以及产量变异性的相关性分析来评判。分别采用本文所述方法和传统方法对研究区域挑选出的 100 个采样点进行肥力综合模糊评价,土壤营养成分数据参照文献[15],土壤微生物分布根据小麦拔节期、抽穗期、成熟期在 1.3 节中所对应季节时段的平均数据确定。将评价结果与小麦不同时期生长和产量的特征参数作相关性分析,相关系数的求解方法为

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^{100} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{100} (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^{100} (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

其中 R_i 为小麦不同时期土壤评价结果 X 与小麦长势或产量特征参数 Y 之间的相关系数; X_i 为采样点土壤的评价结果, Y_i 为采样点小麦的长势或产量特征参数。

小麦不同时期的相关系数分布如表 3 所示,从表中容易看出,所采用的综合评价结果与小麦的长势或产量的相关度均高于传统方法。表明本文所述的基于微生物生态效益的土壤肥力综合评价模型较传统综合评价模型能够更客观地反应土壤的肥力状况。

表 3 不同评价方法的相关系数比较

方法	叶面积指数 (拔节期)	叶面积指数 (抽穗期)	粒/穗平均数 (成熟期)
文献[2]中方法	0.765	0.792	0.749
本文提出方法	0.841	0.861	0.886

4 结 束 语

将土壤微生物生态效益纳入土壤综合肥力评价体系,通过肥力效益折算重新分配各评价指标的权重,采用适宜型隶属度函数建立土壤综合模糊评价模型。通过评价结果的空间变异性和作物产量变异

性之间的相关性分析验证了评价方法的优越性和合理性。因此,该模型可以直接移植入精准农业 GIS 系统,为农业种植处方作业提供直接参考依据。也可以为微生物肥料和化肥复合施用的配方施肥研究提供参考依据。

参 考 文 献

1 韩平,王纪华,潘立刚,等. 北京郊区田块尺度土壤质量评价[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊2):228~234.
Han Ping, Wang Jihua, Pan Ligang, et al. Evaluation of soil quality in suburb of Beijing under field scale[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(Supp. 2):228~234. (in Chinese)

2 张汪寿,李晓秀,黄文江,等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. 农业工程学报,2010,26(12):311~318.
Zhang Wangshou, Li Xiaoxiu, Huang Wenjiang, et al. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 311~318. (in Chinese)

3 Eaton W D, Anderson C, Saunders E F, et al. The impact of pentaclethra macroloba on soil microbial nitrogen fixing communities and nutrients within developing secondary forests in the Northern Zone of Costa Rica [J]. Tropical Ecology, 2012, 53(2): 207~214.

4 Liu H, Wu X Q, Ren J H. Isolation and identification of phosphobacteria in poplar rhizosphere from different regions of China [J]. Pedosphere, 2012, 21(1): 90~97.

5 聂小军,张建辉,苏正安. 紫色丘陵区土壤侵蚀对土壤生物学肥力的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(7):32~37.
Nie Xiaojun, Zhang Jianhui, Su Zheng'an. Soil erosion impacts on soil biological fertility in a purple hilly region[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 32~37. (in Chinese)

6 李桂花. 不同施肥对土壤微生物活性、群落结构和生物量的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(14):204~208.
Li Guihua. Effect of organic amendments and chemical fertilizer on soil microbial activity, biomass and community structure [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(14): 204~208. (in Chinese)

7 Wakelin S A, Gupta V V S R, Forrester S T. Regional and local factors affecting diversity, abundance and activity of free-living, N(2)-fixing bacteria in Australian agricultural soils [J]. Pedobiologia, 2010, 53(6): 391~399.

8 Karpati E, Rethati B, Dallmann K, et al. Study of wheat and rice cultivars in association with nitrogen-fixing bacteria [J]. Novenytermeles, 2000, 49(3): 233~244.

9 刘丽丽. 微生物肥料的生物学及生产技术[M]. 北京:科学出版社,2008.

10 Miransari M. Soil microbes and plant fertilization [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 92(5): 875~885.

11 武春燕. 内蒙古典型草原不同放牧强度下土壤微生物与土壤肥力关系的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2008.

12 陈树人,肖伟中,朱云开,等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析[J]. 农业机械学报,2008,39(10): 140~143.
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 140~143. (in Chinese)

13 Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 86(1): 84~98.

14 NY/T309—1996 全国耕地类型区、耕地地力等级划分 [S]. 1996.

15 肖伟中. 小麦长势与产量信息空间变异性及相关性研究[D]. 镇江:江苏大学,2009.

16 陈云坪,马伟,王秀,等. 基于 PLS 的土壤养分与小麦产量空间相关关系研究[J]. 农业机械学报,2012,43(2):159~164.
Chen Yunping, Ma Wei, Wang Xiu, et al. Relationship between soil nutrient and wheat yield based on PLS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 159~164. (in Chinese)

(上接第 54 页)

16 桂绍波,曹树良,谭磊,等. 前置导叶预旋调节离心泵性能的数值预测与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(12):101~106.
Gui Shaobo, Cao Shuliang, Tan Lei, et al. Numerical simulation and experiment of inlet guide vane pre-whirl regulation for centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 101~106. (in Chinese)

17 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(3):69~73.
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical simulation and experiment on deep-well centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 69~73. (in Chinese)