

矿山复垦土壤生产力指数的修正模型^{*}

卞正富 张国良

(中国矿业大学, 江苏徐州 221008)

摘要 分析了土壤生产力 PI 与 FPI 模型的缺陷; 在建立复垦土壤生产力机理模型的基础上, 提出了复垦土壤生产力指数的修正模型 MPI, MPI 考虑了影响土壤生产力的因子间的相关性和时空变异性。通过实例说明了 MPI 的优越性, 并提出了 MPI 评价复垦质量时应注意的问题。

关键词 复垦土壤, 生产力指数, 模型

中图分类号 TD 84

1 现有模型介绍与分析

复垦土壤生产力水平的评价是一个比较复杂的问题, 因为土地的实际生产力与土壤条件、环境条件(包括水利、种植业结构等)及管理因子(劳动力、人力、物力投入及种植技术等)有关, 而土壤生产力又难以从受上述因子综合影响的实际生产力表现中分离出来。现有的土壤生产力水平模型基本可分为两类, 一类是统计模型, 一类是指数模型。指数模型往往也需通过统计的方法得到土壤生产力指数与土地生产力之间的关系, 因此其实质是统计模型的一个进化模型。统计模型的实质是将作物产量 y 对某一养分含量 x 的响应模型用实验数据统计分析得到, 常用的拟合方程有^[1]:

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

$$y = \frac{ax}{x+b} \quad (2)$$

式中, $a, b, a_0, a_1 \sim a_n$ 为拟合系数。

指数模型的代表是 Neil 提出的土壤生产力系数 (PI) 值及胡振琪在 Neil 基础上改进的模糊 PI 法^[2]。PI 法由式 (3) 表达:

$$PI = \sum_{i=1}^m (A_i \times B_i \times C_i \times WL_i) \quad (3)$$

式中, PI 为土壤生产力指数; A_i 为第 i 土层潜在土壤持水量的适应性; B_i 为第 i 土层土壤容重的适应性; C_i 为第 i 土层 pH 的适应性; WL_i 为第 i 土层的权重; m 为土层总数。

模糊 PI 则用式 (4) 表达:

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49771040)和江苏省青年科技基金资助(BQ98044)

收稿日期: 1998-07-22; 收到修改稿日期: 1999-01-20

$$FPI = \sum_{i=1}^m (w_i \times r_i) = \sum_{i=1}^m [w_i \cdot \sum_{j=1}^{L_i} (R_{ij} \cdot WL_j)] \quad (4)$$

式中, FPI 为土壤生产力指数; w_i 为第 i 个土壤特性的权重, $\sum_{i=1}^m w_i = 1$; m 为土壤特性个数; r_i 为第 i 个土壤特性在整个土壤剖面上的加权平均适应程度; RL_{ij} 为第 i 个土壤特性第 j 土壤层的适应程度; WL_j 为第 j 个土壤层的权重, $\sum_{j=1}^m WL_j = 1$; L_i 为第 i 个土壤特性的土壤层数。利用指数模型评价土壤生产力水平时, 需通过下述统计模型进行转换:

$$y = f(PI) \times ATY \quad (5)$$

式中, y 为当年产量值; $f(PI)$ 为典型资料 y 与 PI 间的统计函数; ATY 为该区域当年调整的目标产量。

从前述的介绍不难发现: ① PI 与 FPI 模型所考虑的土壤属性因子均为一类, 即单个因子对产量的影响是独立的; ② 统计模型、 PI 与 FPI 模型均未考虑复垦区内土壤特性的空间变异性, 实际上复垦土壤常常存在着空间变异现象; ③ 统计模型、 PI 与 FPI 模型没有考虑复垦土壤特性随时间的变化, 而事实上, 复垦土壤通常会随着时间的推移而出现退化或得到熟化; ④ PI 与 FPI 的区别仅在于后者考虑了不同土壤因子的权重并将土壤因子对土壤生产力影响的乘模型改为加权平均模型, 理论上说乘模型和加权平均模型各有优缺点, 因为对某些关键因子用乘模型, 甚至用主因子决定来讨论问题更为符合实际, 而对大多数不起决定性作用的因子用加权平均模型更合理。

2 复垦土壤生产力的机理模型

影响复垦土壤生产力的土壤因子可分为两类, 一类为环境因子, 一类为养分因子。养分因子供给植物生长所需的营养物质, 可用 N、P、K 或速效 N、P、K 与有机质含量表示; 环境因子, 主要指土壤的物理特性, 它直接影响土壤养分被植物利用的程度, 或者说物理因子提供了一个植物吸收土壤中养分的环境, 因此称之为环境因子更为合适。据环境因子对植物吸收土壤养分的影响方式又可分为两类, 一类是环境因子直接作用于植物。如水分, 过量的水会使作物根系处于缺氧状态而死亡, 水分不足会使植物干枯而死, 又如温度因子, 过高会使植物灼伤, 过低则影响植物吸收土壤中的养分。第二类环境因子通过改变或影响土壤中的养分状况而影响植物生长。如 pH 值, 过酸或过碱都会影响土壤中养分的释放, 又如容重, 容重过大不仅会影响植物根系发育, 也影响土壤中养分在土壤溶液中的运移, 因而影响作物对土壤中养分的吸收^[3~6]。

根据上述分析, 设复垦土地内某一点 (x, y) 在 t 年的土壤生产力水平为 $y(x, y, t)$, 则:

$$y(x, y, t) = f[\vec{e}(x, y, t), \vec{n}(x, y, t)] \quad (6)$$

式中: $\vec{e}(x, y, t)$ 为 (x, y) 点 t 年的土壤环境因子向量, $\vec{e} = (e_1, e_2, \dots, e_M)$, $e_1 \sim e_M$ 表示 $1 \sim M$ 个土壤环境因子; $\vec{n}(x, y, t)$ 为 (x, y) 点 t 年的土壤养分因子向量, $\vec{n} = (n_1, n_2, \dots, n_N)$, $n_1 \sim n_N$ 表示 $1 \sim N$ 个土壤养分因子。因此, t 年单位面积的复垦土壤的生产力水平为:

$$y(t) = \frac{1}{A} \iint_A f[\bar{e}(x, y, t), \bar{n}(x, y, t)] dx dy \quad (7)$$

式中, A 为复垦土地的面积或范围。

显然式 (7) 考虑了环境因子与养分因子的空间变异和时间变异, 空间变异和时间变异分别用式 (8)~(9)、(10)~(11) 表示:

$$\bar{e}(x, y, t_0) = \bar{e}(t_0) + \Delta\bar{e}(x, y, t_0) \quad (8)$$

$$\bar{n}(x, y, t_0) = \bar{n}(t_0) + \Delta\bar{n}(x, y, t_0) \quad (9)$$

$$\bar{e}(x_0, y_0, t) = \bar{e}(x_0, y_0, t_0) + \Delta\bar{e}(x_0, y_0, t) \quad (10)$$

$$\bar{n}(x_0, y_0, t) = \bar{n}(x_0, y_0, t_0) + \Delta\bar{n}(x_0, y_0, t) \quad (11)$$

于是, 考虑空间变异的 t_0 年单位面积的复垦土壤生产力水平为:

$$y(t_0) = \frac{1}{A} \iint_A f[\bar{e}(t_0) + \Delta\bar{e}(x, y, t_0), \bar{n}(t_0) + \Delta\bar{n}(x, y, t_0)] dx dy \quad (12)$$

式中: $\bar{e}(t_0)$ 、 $\bar{n}(t_0)$ 为 t_0 年 \bar{e} 、 \bar{n} 因子的多点平均值; $\Delta\bar{e}(x, y, t_0)$ 、 $\Delta\bar{n}(x, y, t_0)$ 为 t_0 年 (x, y) 点 \bar{e} 、 \bar{n} 因子值相对于多点平均值的变差值。

如果用整体空间变异系数 $\bar{r}_e(t_0)$ 、 $\bar{r}_n(t_0)$ 代替 $\Delta\bar{e}(x, y, t_0)$ 、 $\Delta\bar{n}(x, y, t_0)$, (12) 式即为:

$$y(t_0) = f[\bar{e}(t_0) + \bar{r}_e(t_0), \bar{n}(t_0) + \bar{r}_n(t_0)] \quad (13)$$

而考虑时间变异的复垦土壤生产力为:

$$y(x_0, y_0, t) = f[\bar{e}(x_0, y_0, t_0) + \Delta\bar{e}(x_0, y_0, t), \bar{n}(x_0, y_0, t_0) + \Delta\bar{n}(x_0, y_0, t)] \quad (14)$$

式中: $\bar{e}(x_0, y_0, t_0)$ 为某点 (x_0, y_0) 初始年的土壤环境因子值; $\bar{n}(x_0, y_0, t_0)$ 为某点 (x_0, y_0) 初始年的土壤养分因子值; $\Delta\bar{e}(x_0, y_0, t)$ 为某点 (x_0, y_0) 于 t 年的土壤环境因子变差值; $\Delta\bar{n}(x_0, y_0, t)$ 为某点 (x_0, y_0) 于 t 年的土壤养分因子变差值。

若考虑复垦地块单位面积的复垦土壤生产力, 可设 $\bar{e}(x_0, y_0, t_0) = \bar{e}(t_0)$, $\bar{n}(x_0, y_0, t_0) = \bar{n}(t_0)$, $\Delta\bar{e}(x_0, y_0, t) = \bar{r}_{et}(t)$, $\Delta\bar{n}(x_0, y_0, t) = \bar{r}_{nt}(t)$, 则 (14) 为

$$y(t) = f[\bar{e}(t_0) + \bar{r}_{et}(t), \bar{n}(t_0) + \bar{r}_{nt}(t)] \quad (15)$$

可见 (13)、(15) 在形式上是完全一致的, 即复垦土壤的时空变异对土壤生产力的影响规律一致。以 (15) 为例, 对 $y(t)$ 在 $[\bar{e}(t_0), \bar{n}(t_0)]$ 的某一邻域内泰勒展开, 并略去高阶无穷小量, $y(t)$ 可简化为:

$$y(t) = [1 + r_y] f[\bar{e}(t_0), \bar{n}(t_0)] \quad (16)$$

$$r_y = \left[\bar{r}_{et} \frac{\partial}{\partial \bar{e}} + \bar{r}_{nt} \frac{\partial}{\partial \bar{n}} \right] + \frac{1}{2!} \left[\bar{r}_{et} \frac{\partial}{\partial \bar{e}} + \bar{r}_{nt} \frac{\partial}{\partial \bar{n}} \right]^2 + \dots \quad (17)$$

式 (16) 直观地表明, 由于环境因子、养分因子的变异而带来土壤生产力偏离初始状态, 偏离程度可用 r_y 表示。

3 复垦土壤生产力指数的修正模型

复垦土壤生产力的修正模型 (Modified Index of Reclaimed Soil Productivity), 简称 MPI 模型, 满足下列基本要求和基本假设: ① 以式 (13)、(15)、(16) 为基础, 即考虑土壤属性的空间变异性和时间变异性; ② 考虑 \bar{e} 与 \bar{n} 两类因子的相关性; ③ 吸取 PI 和 FPI 用适应

性表示生产力的优点, 对其按照①、②的要求进行修正; ④考虑不同土壤层的属性对土壤生产力的影响; ⑤MPI 与土壤生产力 y 呈正比, 且是线性关系。

根据上述要求, 容易写出 MPI 的形式为:

$$MPI = (1 + r_{MPI})MPI(\bar{e}, \bar{n}) \quad (18)$$

$$\bar{e} = (\bar{e}_{1j}, \bar{e}_{2j}, \dots, \bar{e}_{Mj}), j = 1 \sim s \quad (19)$$

$$\bar{n} = (\bar{n}_{1j}, \bar{n}_{2j}, \dots, \bar{n}_{Nj}), j = 1 \sim s \quad (20)$$

$$MPI(\bar{e}, \bar{n}) = \sum_{i=1}^M \left[w_i \sum_{j=1}^s WL_j S(\bar{e}_{ij}) \right] + \sum_{i=1}^N \left[w_{M+i} \sum_{j=1}^s WL_j S(\bar{n}'_{ij}) \right] \quad (21)$$

$$r_{MPI} = \frac{1}{s(M+N)} \left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^s S(r\bar{e}_{ij}) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^s S(r\bar{n}'_{ij}) \right] \quad (22)$$

式中, MPI 为考虑土壤因子时空变异和养分因子与环境因子相关性的复垦土壤生产力指数, $MPI(\bar{e}, \bar{n})$ 为未考虑土壤因子时空变异, 但考虑了养分因子与环境因子相关性的复垦土壤生产力指数; r_{MPI} 为因时空变异而加的修正系数; \bar{e} 为不同土层的各个样点环境因子平均值向量; \bar{n} 为不同土层的各个样点养分因子平均值向量; s 为土层数; w_i 为土壤因子 i 的权重, $\sum_{i=1}^{M+N} w_i = 1$; WL_j 为第 j 层土的权重; $S(\bar{e}_{ij})$ 为 j 土层 i 环境因子平均值 \bar{e}_{ij} 对作物生长的适应性; $S(\bar{n}'_{ij})$ 为 j 土层 i 养分因子平均值 \bar{n}_{ij} 根据 \bar{e}_{ij} 修正后得到的 \bar{n}'_{ij} 对作物生长的适应性; $S(r\bar{e}_{ij})$ 为 j 土层 i 环境因子相对于平均值的变异系数使 \bar{e}_{ij} 适应性增减值; $S(r\bar{n}'_{ij})$ 为 j 土层 i 养分因子相对于平均值的变异系数使 \bar{n}'_{ij} 适应性增减值。

4 MPI 模型的应用

淮北矿区某块复垦地的土壤 pH 值、容重、速效氮、速效磷、速效钾及有机质与对照农田的相应指标对比如表 1, 影响复垦土壤养分吸收的主要环境因子包括复垦土壤的容重和 pH 值。对照田种植的小麦实际生产力水平为 6030 kg/hm^2 , 复垦田的实际验证产量为 4815 kg/hm^2 。

表1 淮北某复垦地与对照田的土壤环境因子、养分因子对比

Table 1 Comparison of several environmental and nutrient factors in reclaimed soil with that of ordinary soil in Huaibei mine area

土壤类别	环境因子		养分因子			
	Environmental factors		Nutrient factors			
Type of soil	酸碱度	容重	速效氮	速效磷	速效钾	有机质
	pH	Bulk density	Rapidly available nitrogen	Rapidly available phosphorous	Rapidly available potassium	Organic matter
		(g/cm^3)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(10^4 mg/kg)
复垦土壤	6.6	1.55	5.94	27.78	59.75	0.57
对照田土壤	7.1	1.21	9.61	10.29	77.36	1.32

利用 MPI 评价复垦土壤生产力的步骤为: ①确定不同因子的权重 $W = (w_i)$ 和不同土

壤层的权重 $WL = (WL_j)$; ②选择不同因子对作物生长的适应性函数 $S(e_{ij})$ 和 $S(n_{ij})$; ③确定环境因子对养分因子的修正标准, 并修正养分因子的取值; ④利用环境因子 e_{ij} 和修正后的养分因子值 n'_{ij} , 根据适应性函数对不同土层的不同评价因子进行适应性评定, 得到复垦土壤的环境因子与养分因子适应性分值; ⑤按式 (21) 分别求取复垦土壤与对照土壤的 MPI ; ⑥按式 (22) 分别求取复垦土壤与对照土壤的 r_{MPI} ; ⑦按式 (18) 分别计算复垦土壤和对照土壤的 MPI ; ⑧用式 (23) 计算复垦土壤生产力水平。

$$y_r = \frac{MPI_r}{MPI_c} \times y_c \quad (23)$$

式中, y_r 为复垦土壤生产力水平 (kg/hm^2); MPI_r 为复垦土壤的 MPI 指数; MPI_c 为对照田的 MPI 指数; y_c 为对照田的生产力水平 (kg/hm^2)。

w_i 和 WL_j 的确定方法可以用多元统计分析法、层次分析法等方法确定, 为便于和 FPI 法对比, 本例取 $W = (0.2, 0.2, 0.15, 0.15, 0.15, 0.15)$, 本例仅一个土层, 所以, $WL_1 = 1$ 。

不同因子对作物生长的适应性函数 $S(e_{ij})$ 和 $S(n_{ij})$ 依式 (24) ~ (29) 算出, 酸碱度、容重、速效氮、速效磷、速效钾、有机质分别用 pH、d、Na、Pa、Ka 和 O.M. 表示, 其中 S_d 、 $S'_{O.M.}$ 直接源于文献 [2]。

$$S_{\text{pH}} = \begin{cases} 1 & \text{pH} \in [6, 7.5] \\ \frac{1}{3}\text{pH} - 1 & \text{pH} \in [3, 6] \\ -\frac{2}{3}\text{pH} + 6 & \text{pH} \in (7.5, 9] \end{cases} \quad (24)$$

$$S_d = \begin{cases} 1 & d \leq 1.30 \\ 1.88 - 0.68d & d \in (1.3, 1.55] \\ 5.98 - 3.32d & d \in (1.55, 1.8] \end{cases} \quad (25)$$

$$S_{\text{Na}} = \begin{cases} 1 & \text{Na} \geq 100 \\ 0.01\text{Na} & \text{Na} \in [0, 100] \end{cases} \quad (26)$$

$$S_{\text{Pa}} = \begin{cases} 1 & \text{Pa} \geq 15 \\ 0.05\text{Pa} + 0.25 & \text{Pa} \in [5, 15] \\ 0.1\text{Pa} & \text{Pa} \in [0, 5] \end{cases} \quad (27)$$

$$S_{\text{Ka}} = \begin{cases} 1 & \text{Ka} \geq 200 \\ 3 \times 10^{-3}\text{Ka} + 0.4 & \text{Ka} \in [100, 200] \\ 0.007\text{Ka} & \text{Ka} \in [0, 100] \end{cases} \quad (28)$$

$$S_{\text{O.M.}} = \begin{cases} 1 & \text{O.M.} \geq 2 \\ (0.5882 \times \text{O.M.} - 0.1765)^{0.3762} & \text{O.M.} \in (0.3, 2] \\ 0 & \text{O.M.} \leq 0.3 \end{cases} \quad (29)$$

复垦土壤与对照土壤养分的修正值如表 2。本例养分因子分别按 pH 值和土壤容重的

取值而修正,按 pH 值修正的标准参见文献 [7],按土壤容重修正的标准是以百分比 $d_c/d\%$ 进行修正, d_c 为对照田的土壤容重, d 为复垦土壤的容重。

表2 复垦土壤与对照土壤养分因子修正值

Table 2 Value of nutrient factors in reclaimed soil and ordinary soil after modified

土壤类别 Type of soil	环境因子 Environmental factors		养分因子 Nutrient factors			
	酸碱度 pH	容重 Bulk density (g/cm ³)	速效氮 Rapidly available nitrogen (mg/kg)	速效磷 Rapidly available phosphorous (mg/kg)	速效钾 Rapidly available potassium (mg/kg)	有机质 Organic matter (10 ⁴ mg/kg)
	复垦土壤	6.6	1.55	4.28	13.43	46.64
对照田土壤	7.1	1.21	9.61	10.29	77.36	1.32

据修正值所作的适应性评定结果如表3。

表3 不同因子的适应性评定

Table 3 Adaptive assessment of various factors

土壤类别 Type of soil	环境因子适应性 Adaptive degree of environmental factors			养分因子适应性 Adaptive degree of nutrient factors		
	酸碱度 pH	容重 Bulk density	速效氮 Rapidly available nitrogen	速效磷 Rapidly available phosphorous	速效钾 Rapidly available potassium	有机质 Organic matter
	复垦土壤	1	0.826	0.0428	0.9215	0.3265
对照田土壤	1	0.9892	0.0961	0.7645	0.5415	0.8251

因本例为复垦初始年评价, r_{et} , r_{nt} 均为 0, 因此 $r_{MPI} = 0$ 。于是, 很容易计算得到 MPI , 为 0.6174, MPI_c 为 0.7319, y_i 为 5086.7kg/hm²。结果表明 MPI 法的评价结果与实际产量值相差 271.7kg/hm², 误差为 5.6%, 说明本法具有一定的可信度。同时, 本例还用 FPI 模型计算了复垦土壤与对照土壤的 FPI 值分别为 $FPI_i = 0.6612$, $FPI_c = 0.7319$, 由 FPI 法评定的生产力水平值为 5447.5kg/hm², 比实际产量大 632.5kg/hm², 误差为 13.1%。显然, MPI 的评价结果较 FPI 的评价结果更接近实际产量, 且准确度提高了 7.5%。从上述计算不难发现: 土壤环境因子和养分因子之间相关性的修正是 MPI 评价结果精度更高的关键所在。所以, MPI 的提出不仅符合土壤生产力机理模型的解释, 同时对实际应用也具有较好的结果, 克服了 PI 和 FPI 不考虑土壤因子之间相关性的不足。

利用土壤生产力指数评价复垦质量时, 需注意以下几个问题:

1. 通常情况下, 应该用生产力恢复系数 q , 如式 (30) 来评价。计算出的 y_i 并非理论上的土壤生产力, 不能用其表示不同复垦地块或不同复垦方案对土壤生产力恢复的程度。

$$q = MPI_i / MPI_c \quad (30)$$

2. 参评因子的选取很重要, 一般应选择那些反映复垦土壤与对照土壤差异的且对作物生长起决定作用的土壤因子。比如对矿山土而言, 土壤环境因子以 pH 值和土壤容重 d 较为合适, 沉陷区复垦土壤可能以盐碱度和土壤容重较为合适。

3. 本法提出的土壤生产力评价应考虑因子之间的相关性和因子本身的变异性这一

结论符合土壤生产力机理模型的解释,但其适用价值尚需用更多的实验点去验证。

参 考 文 献

1. 沈思渊. 产量生态学的模型方法. 见: 马世骏. 现代生态学透视. 北京: 科学出版社, 1990. 282~290
2. 胡振琪. 采煤沉陷土地资源的管理与复垦. 北京: 煤炭工业出版社, 1996
3. Martin J H. Soil quality standards for reclaimed coal-mine disturbed lands: A discussion paper. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1995, 9:187~202
4. Singh G, Bhattacharya F. Proposed criteria for assessing subsidence damage to renewable resource lands. *Mining Engineering*, 1987, 3:189~193
5. Darmody R G. Coal mine subsidence: The effect of mitigation on crop yields. In: *Proceedings of 3rd Subsidence Workshop due to Underground Mining*, 1993. 182~187
6. Kost D A, Vimmerstedt J P. Topsoil and fertilizer effects on ground cover growth on calcareous minesoils. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1997, 11:15~19
7. Jim Beuerlein, Jay Johnson, Mark Loux et al. *Ohio Agronomy Guide*. 13th ed. The Ohio University Extension, 1995

MODIFIED INDEX OF RECLAIMED SOIL PRODUCTIVITY

Bian Zheng-fu Zhang Guo-liang

(*China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008*)

Summary

Available model of reclaimed soil productivity is of inevitably short for evaluating reclaimed soil productivity. After developing a model to explain the mechanism of reclaimed soil, modified index model of reclaimed soil productivity (MPI) is conducted. Interactions of factors, which affect reclaimed soil productivity and their variability, are considered in MPI. An example for verifying the advantage of MPI is given in this paper.

Key words Reclaimed soil, Productivity index, Model