

基于特征向量的旱地连续种植模式 土壤肥力综合评价

陈长青¹, 何园球², 卞新民^{1*}, 余德贵¹

(1 南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 江苏南京 210095;

2 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

摘要: 为了探索红壤区旱地种植模式对土壤肥力的影响, 以及合理利用资源目的, 本研究选择当地常见的种植模式以及运用常规施肥方式进行了连续性的小区试验, 并根据综合评价原理, 运用数理统计学知识, 采用方差分析方法, 构造了基于特征向量的指标权重计算方法, 对红壤旱地连续种植模式下土壤肥力进行了综合分析。结果表明, 该模型能够比较合理地反映试验数据的变化趋势, 比较恰当地反映土壤肥力变化情况, 评价分析方法具有一定的科学性和正确性。模型分析结论为: 柰李 + (花生—绿肥—花生) 对提高土壤肥力效果相对最佳, 而对照最差。研究还以试验小区的生物量和能量效益分析验证了结果。

关键词: 土壤肥力; 综合评价; 方差分析; 特征向量

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2007)04-0620-05

Soil fertility comprehensive evaluation under continuous farming pattern on dry land base on eigenvector

CHEN Chang-qing¹, HE Yuan-qiu², BIAN Xin-min^{1*}, YU De-gui¹

(1 Key lab of Crop Growth Regulation, Ministry of Agriculture, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China;

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China)

Abstract: The dry land on red soil is barren, and the improper farming may cause the soil fertility decline, even degradation. In China, cropping patterns on dry land are diversified. The effects of different cropping patterns on soil fertility are different. In order to study the influence of continuous cropping patterns on the soil fertility on the dry land with red soil, a five years field pilot trial with local traditional farming patterns and the conventional fertilization were carried out. Weighting index based on eigenvectors were adapted to evaluate for the soil fertility on red soil dry land under continuous cropping patterns. The results indicate that this model is able to reflect the data change tendency, and the soil fertility changing situation could be reflected appropriately, and this evaluation analysis method has certain scientificness and correctness. Based on the resulted of the model, Chinese pear + (peanut-green manure-peanut) were the optimal cropping pattern in terms of the soil fertility, while the traditional pattern was the worst. These results were corroborated by the biomass and energy benefit analysis.

Key words: soil fertility; comprehensive evaluation; deviation analysis; eigenvector

长期不合理的土地利用会导致土壤退化严重, 肥力贫瘠。由于连续不同的耕作方式导致土壤肥力上的差异, 因此, 对土壤肥力进行综合分析, 可以及

时了解种植模式对土壤肥力的影响, 从而调整种植模式和施肥方式。土壤肥力评价是对土壤肥力高低的评判和鉴定。当前对土壤肥力数量化评价多采用

收稿日期: 2006-04-05

修改稿收到日期: 2006-07-06

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-407); 国家自然科学基金(30571094)资助。

作者简介: 陈长青(1969—)男, 湖北武汉人, 博士, 主要从事农业生态、耕作制度研究。Tel: 025-84385338, E-mail: c7450@263.net

* 通讯作者 Tel: 025-84385338, E-mail: bjxlm@163.com

静态分析,主要是运用数理统计方法和地理信息系统及地统计学原理开展土地适宜性评价和农用地分等定级等方面的研究^[1-7];也有用聚类分析、因子分析、判别分析法、指数和法及模糊数学方法对土壤肥力进行综合评价^[8-12];但对连续耕作下土壤肥力变化研究的报道较少。由于影响土壤肥力的因素较多,目前大部分评价方法只是通过经验确定指标权重,评价结果仅简单累加,不能更好地正确反映评价原始数据尽可能多的信息;同时也没有考虑指标间可能存在的线性关系。本研究利用数理统计方法对旱地连续种植模式下土壤肥力评价进行分析,主要是为土壤肥力评价选择一个客观的评价方法以及为旱地红壤的合理利用和保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验设在位于江西省余江县的中国科学院红壤生态试验站。供试土壤为第四纪红色粘土发育的退化红壤,试验前土壤的基本性质见表 1。该地块 1989~1995 年的种植模式是花生—油菜连作;1996 年起在坡度为 5° 的缓坡地建立 5 个小区,其中前 3 个小区面积为 5 m×20 m(标准小区),而其余 2 个的

面积为 12 m×20 m。每个小区内设 3 次重复(对照除外)。农作物在小区中进行等高种植,依次排列为:① 柑+(花生—绿肥—花生);② 柰李+(花生—绿肥—花生);③ 自然恢复(对照);④ 花生—绿肥—花生;⑤ 玉米—荞麦—大麦—玉米 5 种植模式。柑和柰李密度为每公顷 600 株,玉米密度每公顷 51000 株。采用施肥方式:①、②施用有机肥(厩肥)。有机肥用量按当地习惯用量 30 000 kg/hm²(鲜基),含水率为 74%,折合为风干厩肥 7633 kg/hm²,其养分含量为有机 C 265.0、全 N 36.5、全 P 23.0、全 K 52.0 g/kg。④、⑤ 施用化肥。N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 75.0、127.5、150.0 kg/hm²,氮肥是尿素,磷肥是钙镁磷肥,钾肥是氯化钾。该试验小区的花生秸秆全部归还到本小区,绿肥全部翻耕还田。

每年 12 月采集样品,用环刀法测定土壤容重,有机质用外加热重铬酸钾容量法测定,全氮用硫酸重铬酸钾消化、半微量定氮法测定,全磷用硫酸—高氯酸消化、钼锑抗比色法测定,有效磷用 Olsen 法测定,全钾用氢氟酸—高氯酸消煮、火焰光度法测定,速效钾用乙酸铵提取、火焰光度法测定,测定方法均参照《土壤农业化学常规分析方法》。

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 The physicochemical properties of soil tested

土层深度 Depth (cm)	pH	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	水解氮 Hyd. - N	有效磷 Avail. - P	交换钾 Ex. - K
		(g/kg)				(mg/kg)		
0—15	5.16	6.40	0.34	0.53	10.6	0.27	3.90	50.0
15—30	5.18		0.38	0.57	10.9	0.27	2.75	
30—50	5.20		0.40	0.51	10.5	0.27	2.71	

1.2 评价方法

1.2.1 原理 线性模型方差越大,特征向量反映的信息量越大,特征向量即为各指标变量的权重,取最大特征根贡献率,这时候的特征向量即为各指标权重。

1.2.2 分析步骤 设 m 个样本 n 个指标的评价模型为:

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

其中, y_j 为第 i 个样本的综合评价值, a_j 为第 j 个指标的权重, x_{ij} 为原始数据。(1) 评价模型的关键是确

定 a_j 。合理评价的原则是确定最佳的 a_j , 使(1)能正确反映 x_{ij} 的所有信息,也就是综合评价 y 的方差最大,记 $Var(y)$ 表示 y 的方差,即:

$$\begin{aligned} Var(y) &= Var(A^T X) = E[(A^T X - E(A^T X))^2] \\ &= A^T EX - E(X)^T A \\ &\leq A^T E(XX^T) A \leq A^T XX^T A \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $A^T = (a_1, a_2, \dots, a_j)$; X 为 $m \times n$ 矩阵,是原始数据, $x_{ij} > 0$; $E(X)$ 表示 X 的期望。令 $R = XX^T$, 则易知 R 为实对称阵。故存在正交阵 Q , 将 R 对角化:

$$Q^T R Q = \Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ & \dots \\ 0 & \lambda_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ 。由(2),(3)有

$$\begin{aligned} \text{Var}(y) &\leq A^T X X^T A = A^T R A = A^T (Q^T \Lambda Q) A \\ &= A^T (\lambda_1 Q_1, \lambda_2 Q_2, \dots, \lambda_n Q_n) \begin{pmatrix} \lambda_1 Q_1 \\ \lambda_2 Q_2 \\ \vdots \\ \lambda_n Q_n \end{pmatrix} A \\ &\leq \lambda_1 A^T Q Q^T A = \lambda_1 A^T A \end{aligned}$$

当 $A = Q_1$ 时,

$$\text{Var}(y) \leq \lambda_1 A^T A \leq \lambda_1 Q_1^T Q_1 = \lambda_1 \quad (4)$$

(4) 说明 y 的最大方差是对称阵 $R = X X^T$ 最大特征根, 而此时权重 A 为 λ_1 所对应的特征向量。将 $Q_1 = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ 归一化确定评价指标的权:

$$\begin{aligned} A^T &= (a_1, a_2, \dots, a_n), \\ a_i &= \frac{|q_i|}{\sum_{j=1}^n |q_j|} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (5)$$

$$(5) \text{ 综合评价 } P \quad P = X A^T \quad (6)$$

2 结果分析

建立评价指标体系是土壤肥力质量评价的重要内容。指标体系应客观地反映出土壤的肥力现状, 选择的评价指标应具有广泛代表性、普遍性, 还应符合最小指标集的要求。此外, 指标的确定还要符合可度量、可测量的特性。根据红壤特性, 本例红壤肥力评价研究所选指标为: PH、有机质、全氮、全磷、全钾、速效钾、速效磷、阳离子交换量和容重。对 5 种不同的种植模式对土壤肥力的影响进行综合评价, 分析步骤与结果如下。

2.1 原始数据 ($X_{5 \times 9}$)

从表 2 的数据大小上看, 不同种植模式大部分指标值, 从土壤肥力上可解释为增加或改善。方差分析表明, 不同种植模式的绝大部分指标和对照也有显著性差异, 说明种植模式对土壤肥力改善上效果明显; 但不同种植模式不同指标差异比较混乱, 无法说明综合肥力改善情况。为此, 采用如下步骤

表 2 连续种植模式下土壤肥力概况

Table 2 Soil fertility under continuous farming pattern

模式 Pattern	pH	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	速效钾 Avail. K	速效磷 Avail. P	阳离子交换 量 CEC	容重 Bulk density
		(g/kg)			(mg/kg)		(cmol/kg)	(g/cm ³)	
①	4.81 a	11.50 d	0.68 bc	1.00 c	11.13 d	115.8 b	1.63 b	8.40 c	1.21 a
②	5.01 b	12.30 e	0.70 c	0.96 c	10.19 a	171.3 e	1.86 c	8.74 d	1.22 ab
③	5.13 c	8.60 a	0.53 a	0.62 a	10.38 b	50.8 a	0.68 a	7.31 a	1.26 c
④	5.10 c	10.60 c	0.64 b	0.66 a	10.83 c	155.4 d	2.10 d	7.72 b	1.23 b
⑤	5.12 c	10.00 b	0.65 bc	0.76 b	9.96 a	125.3 c	0.72 a	9.08 e	1.22 b

注 (Note): 2001 年取样数据 Data from 2001; 字母不同表示差异达 5% 显著水平 Different letters mean significant at 5% level.

进一步分析哪种模式对土壤肥力提高更为显著。

2.2 分析步骤与结果

1) 计算对称阵 $R = X X^T$:

$$R = \begin{pmatrix} 126.67 & 266.19 & 16.08 & 20.05 & 263.96 & 310.82 & 35.03 & 207.47 & 126.68 & 266.19 \\ 266.19 & 569.86 & 34.27 & 43.24 & 557.00 & 677.58 & 76.93 & 439.60 & 266.19 & 569.86 \\ 16.08 & 34.27 & 2.07 & 2.60 & 33.61 & 40.65 & 4.58 & 26.55 & 16.08 & 34.27 \\ 20.05 & 43.24 & 2.60 & 3.32 & 42.07 & 50.95 & 5.77 & 33.32 & 20.05 & 43.24 \\ 263.96 & 557.00 & 33.61 & 42.07 & 551.95 & 649.27 & 74.07 & 432.47 & 263.96 & 557.00 \\ 310.82 & 677.58 & 40.65 & 50.95 & 649.27 & 851.83 & 95.85 & 517.86 & 310.82 & 677.58 \\ 35.02 & 76.93 & 4.58 & 5.77 & 74.07 & 95.85 & 11.51 & 57.67 & 35.03 & 76.93 \\ 207.46 & 439.60 & 26.55 & 33.32 & 432.47 & 517.86 & 57.67 & 342.43 & 207.47 & 439.60 \\ 30.96 & 65.05 & 3.93 & 4.91 & 64.55 & 75.75 & 8.54 & 50.71 & 30.96 & 65.05 \end{pmatrix}$$

2) 计算 R 的最大特征根 λ_1 以及 λ_1 对应的特征向量 Q_1 :

$$\lambda_1 = 2415.93$$

$$Q_1^T = (-0.2263, -0.4847, -0.0292, -0.0366, -0.4729, 0.5837, -0.0659, -0.3739, -0.0553)$$

3) 根据公式(5) 计算指标权重 A^T :

$$A^T = (0.0972, 0.2082, 0.0125, 0.0157, 0.2031, 0.2507, 0.0283, 0.1606, 0.0237)$$

4) 根据公式(6) 计算综合评价价值 P :

$$P = XA^T = (9.4725, 10.9184, 6.9096, 10.1439, 9.2712)$$

根据评价价值大小,得出不用模式对土壤肥力综合评价结果:③ < ⑤ < ① < ④ < ②,即对照对土壤肥力提高效果最差,而柰李+(花生一绿肥一花生)对提高土壤肥力效果最佳。为进一步说明问题,分析了红壤旱地不同种植模式的能量效益。表3得出,所有种植模式所列指标值2001年都较2000年增加,说明在施肥量保持不变的情况下,土壤供肥能力在增加,种植制度对土壤肥力有影响。从5种模式之间差异来看,模式②的生物量、能量产投比和光能利用率都较其他模式高,从侧面说明了模式②土壤肥力增加最高,因而对红壤旱地来说,该种模式值得推广。

表3 红壤旱地不同种植模式的能量效益

Table 3 Energy benefit of dry land of red soil for different farming pattern

模式 Pattern	年份 Year	生物量 Biomass (kg/hm ²)	产出能 Output energy (×10 ⁶ cal/hm ²)	投入能 Input energy (×10 ⁶ cal/hm ²)	净增能 Net Increased energy (×10 ⁶ cal/hm ²)	产投比 Ratio of output and input	光能利用率(%) Efficiency for sola energy utilization
①	2000	12132	52791	21406	31384	2.47	1.05
	2001	14166	61660	17785	43995	2.97	1.23
②	2000	13498	58704	20149	38547	2.91	1.17
	2001	15519	67795	19255	48540	3.52	1.35
③	2000	2763	8302	—	8302	—	0.09
	2001	4891	14673	—	14673	—	0.16
④	2000	8282	29594	10690	18903	2.77	0.62
	2001	8973	32060	11281	20778	2.84	0.66
⑤	2000	10713	38914	12315	26599	3.16	0.73
	2001	11150	40502	12424	28078	3.26	0.79

3 讨论

本研究只选取了当地应用最广泛的种植模式进行了土壤肥力综合评价,得出的结果仅代表不同模式对土壤的保肥和利用的能力。在本例中模式②仅仅是果树不同而导致结果上的差异,需进一步探讨果树对作物生长的影响,以及对土壤肥力的影响。在南方红壤坡地广泛种植各类果树,间作作物类型较多,本研究可为其他果农类型种植模式土壤肥力评价提供参考。

本研究综合评价的目的是选择一个新的土壤肥力评价方法,并且从中找到一种或几种较好的旱地种植模式。由于本研究试验时间不长,仅对土壤肥力变化的一个方面进行了探讨,所得结果还有待进一步验证;特别是土壤肥力的变化不仅和种植作

物有关,还受施肥方式、管理措施等因素影响。从本研究可以看出,施用的肥料类型对结果有明显影响,因而更为准确的评价需要同时考虑种植制度与栽培管理措施的影响。

在保持土壤肥力或不断改善土壤肥力的同时,需要提高土地的生产潜力。应考虑到作物产量和经济效益,甚至生态效益,使红壤旱地土壤肥力得到改善的同时各种资源也得到充分合理利用。使土地能够得到更加合理的利用也是土壤肥力综合评价的目的之一。

参考文献:

- [1] 周勇,李学垣,贺纪正,等. ARC/INFO 信息系统在农地分等定级中的应用[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 450-460.
Zhou Y, Li X Y, He J Z et al. Application of Arc/Info Gis in grading

- of agricultural lands[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1998, 35(4): 450-460.
- [2] 孙艳玲, 郭鹏, 刘洪斌, 等. 基于 GIS 的土壤肥力综合评价[J]. 西南农业大学学报, 2003, 25(2): 176-179.
Sun Y L, Guo P, Liu H B *et al.* Comprehensive evaluation of soil fertility based on Gis[J]. *J. Southwest Agric. Univ.*, 2003, 25(2): 176-179.
- [3] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报, 1995, 32(4): 362-368.
Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Comprehensive evaluation of soil fertility in the hilly and mountainous region of southeastern China [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1995, 32(4): 362-368.
- [4] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality [A]. Doran J W (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment* [C]. Madison: I SSSA Spec, 1994: 35: 3-21.
- [5] Pennock D J, Anderson D W, De Jong E. Landscape-Scale changes in indicators of soil quality due to cultivation in Saskatchewan[J]. *Can. Geoderma*, 1994, 64: 1-19.
- [6] Shen Z Q, Shi J B, Wang K *et al.* Neural network ensemble residual kriging application for spatial variability of soil properties [J]. *Pedosphere*, 2004, 14(3): 289-296.
- [7] Smith J L, Halvorson J J, Papendick R I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 743-749.
- [8] 隋跃宇, 焦晓光, 张兴义, 等. 农田黑土肥力综合评价研究[J]. 土壤肥料, 2005 (5): 46-49.
Sui Y Y, Jiao X G, Zhang X Y *et al.* Comprehensive evaluation of cultivated black soil fertility[J]. *Soils Fert.*, 2005 (5): 46-49.
- [9] 许咏梅, 王讲利, 刘骅. 应用综合评分法评价新疆灰漠土土壤质量的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 465-468.
Xu Y M, Wang J L, Liu H. Evaluation of grey desert soil quality by index method[J]. *Chin. J. Soil Sci.* 2005, 36(4): 465-468.
- [10] 薛红霞, 何江华. 广东省耕地地等中的土壤肥力评价指标体系[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 461-462.
Xue H X, He J H. The evaluation criteria system of soil fertility in the ultivated land grading in Guangdong Province[J]. *Ecol. Environ.*, 2004, 13(3): 461-462.
- [11] 马强, 宇万太, 赵少华, 等. 黑土农田土壤肥力质量综合评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1916-1920.
Ma Q, Yu W T, Zhao S H *et al.* Comprehensive evaluation of cultivated black soil fertility [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2004, 15(10): 1916-1920.
- [12] 王军艳, 张凤荣, 王茹, 等. 应用指数和法对潮土农田土壤肥力变化评价研究[J]. 农村生态环境, 2001, 17(3): 13-16.
Wang J Y, Zhang F R, Wang R *et al.* Application of integrated fertility index method in evaluating changes in soil fertility [J]. *Rural Eco-Environ.*, 2001, 17(3): 13-16.