DOI:10.13758/j.cnki.tr.1995.03.002

南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价*

孙 波　　张桃林　　赵其国

（中国科学院南京土壤研究所）

摘　要

本文利用模糊(Fuzzy)数学和多元数理统计分析原理，建立了一个综合评价土壤养分贫瘠化的方法，并且利用第二次全国土壤普查资料对我国东南丘陵山区土壤养分贫瘠化的现状进行了综合评价。根据评价结果，采用地理信息系统(GIS)软件 ARC/INFO 绘制了东南丘陵山区土壤养分贫瘠化状况图。最后，分析了引起养分贫瘠化的原因，并提出了防治养分贫瘠化的策略和措施。结果表明，这一地区土壤养分大多处于中度贫瘠化水平，土壤养分处于轻度、中度和严重贫瘠化的面积比例分别为21.5%、49.5%和29.0%，其中水田土壤的养分贫瘠化程度相对较林旱地土壤要轻。总体看来，两湖平原、湘南红壤和水稻土区、珠江三角洲平原、皖南山区、广西百色与南宁地区交界处以及桂林地区土壤养分的贫瘠化水平较低；桂粤闽的赤红壤区、鄂西石灰土区和浙江的大部分红壤区土壤养分贫瘠化严重；湖南的山区、赣闽的红壤区、广西的河池地区、广东的北部和海南岛的中西部土壤养分处于中度贫瘠化水平。森林的开垦和退化、土壤侵蚀与地表径流、淋失以及养分投入水平低，比例不合理是引起土壤养分贫瘠化的主要因素。必须应用系统论原理，从调整农村产业结构、发展农村经济开始，增加农业的整体投入，优化农业生态系统的结构，合理施肥，减少水土流失，最终达到防治土壤养分贫瘠化的目的。

目前，我国南方丘陵山区仍处于资源制约型农业阶段，人口、资源、环境、粮食间的矛盾是该区农业持续发展面临的主要问题，特别是资源的不合理利用，造成资源的退化与巨大潜力的浪费，限制了这一地区农村经济的协调发展。在各种资源中，土地资源的退化十分严重，尤其是土壤养分的贫瘠化十分普遍。因此，综合评价该区土壤养分贫瘠化的现状，并据此提出防止养分贫瘠化的措施和策略，对于挖掘土壤资源潜力，提高农业生态系统生产力，具有十分重大的意义。

一、南方丘陵山区土壤肥力现状

南方丘陵山区(长江以南、云贵高原以东包括琼、桂、粤、闽、湘、赣、浙、鄂、皖9省)，土地总面积为113.3万平方公里，占全国土地总面积的11.8%，跨越热带、亚热带，具有丰富的光、热、水、土和生物资源，在我国农业和经济发展中历来占有举足轻重的地位。

受东南季风影响，该区高温多雨，矿物风化和土壤淋溶作用强烈，土壤多呈酸性反应，阳离子交换量低，保肥供肥性能差，土壤自然肥力不高。另一方面，由于长期不合理的开发利用，水土流失严重，特别是农业生态系统中养分循环与平衡的失调，加剧了土壤尤其是旱地的养分贫瘠化及肥力衰减过程。据土壤普查资料，当前农田中68%为中低产田，耕地普遍缺少有机质和氮素，全部旱地和60%的水田缺磷，耕地中58%缺钾，80%缺硼，64%缺钼，49%缺锌，18%缺

* 本文为国家"八五"攻关专题"南方红壤退化机制及防治对策研究"和中国科学院"九五"前期研究项目"南方丘陵山区资源综合开发与持续发展"的部分研究结果。

镁。可见，营养元素的缺乏和土壤肥力的衰退，已严重阻碍着本区农业生产的持续发展。此外，由于农药残留与酸雨的影响，土壤酸化及土体各种污染也日趋严重。

总的说来，这一地区土壤的综合肥力大多处于中下水平，高、中、低肥力土壤的面积比例分别为25.9%、40.8%和33.3%。内陆腹地，特别是土壤肥力较高的安徽沿江平原、鄱阳湖平原、湘西武陵山区和广西的河池等地区，土壤肥力资源尚有较大潜力待进一步挖掘[1]。

二、南方丘陵山区土壤养分贫瘠化的评价方法

在研究这一地区的土壤肥力时，我们曾经利用模糊(Fuzzy)数学和多元数理统计分析原理，建立了一个综合评价土壤肥力的方法[1]。本文利用相同原理，计算了土壤养分贫瘠化的综合性评价指标，对本区土壤中各种养分的贫瘠化现状以及土壤养分的总体贫瘠化状况进行了评价。具体步骤如下：

（一）建立土壤养分数据库

土壤中的养分元素很多，但与植物生长关系最大的主要是C、N、P、K这4种大量元素，而且关于这方面的数据也容易获得。因此，我们选择了土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾这6项指标，从全国第二次土壤普查资料中，分省收集东部丘陵区各类土壤表层的相应数据。然后，利用FOXBASE软件建立土壤养分含量数据库。

（二）确定各土壤养分贫瘠化等级的划分标准

根据本区不同利用方式下土壤养分的含量特征，以及各种养分与植物生长间的关系，并参考已有的研究结果[1,2]，我们把土壤养分的贫瘠化水平分为4个等级：肥沃、轻度贫瘠、中度贫瘠和严重贫瘠。各土壤养分贫瘠化等级的相应划分标准见表1，由于土壤有机质和全氮在不同利用方式下差异较大，因而根据利用方式设置了不同的划分标准，而P、K两种元素的差异较小，所以设置了相同的划分标准。

表1　土壤养分贫瘠化的划分标准

土地利用方式	贫瘠化等级	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
水田	肥沃	>3.0	>0.20	>0.10	>2.5	>15	>150
	轻度贫瘠	2.25－3.0	0.135－0.20	0.07－0.10	1.75－2.5	10－15	100－150
	中度贫瘠	1.5－2.25	0.075－0.135	0.04－0.07	1.0－1.75	5－10	50－100
	严重贫瘠	<1.5	<0.075	<0.04	<1.0	<5	<50
旱地	肥沃	>2.0	>0.15	>0.10	>2.5	>15	>150
	轻度贫瘠	1.5－2.0	0.10－0.15	0.07－0.10	1.75－2.5	10－15	100－150
	中度贫瘠	1.0－1.5	0.05－0.10	0.04－0.07	1.0－1.75	5－10	50－100
	严重贫瘠	<1.0	<0.10	<0.04	<1.0	<5	<50
林地	肥沃	>6.0	>0.25	>0.10	>2.5	>15	>150
	轻度贫瘠	4.0－6.0	0.175－0.25	0.07－0.10	1.75－2.5	10－15	100－150
	中度贫瘠	2.0－4.0	0.10－0.175	0.04－0.07	1.0－1.75	5－10	50－100
	严重贫瘠	<2.0	<0.10	<0.04	<1.0	<5	<50

（三）计算土壤养分贫瘠化的综合评价指标

1. 单项评价指标值的计算

对土壤中的各种养分建立相应的隶属度函数，计算其隶属度值，以此表示各种养分所处的贫瘠化状态值。由于C、N、P、K4种元素的作物效应曲线为S型，所以隶属度函数也采用S型，并把曲线型函数转化为相应的折线型函数，以利于计算。其隶属度函数如下：

$$f(X)=\begin{cases}1.0 & X\geqslant X_2\\ (X-X_1)/(X_2-X_1)*0.9+0.1 & X_1\leqslant X<X_2\\ 0.1 & X<X_1\end{cases}$$

相应的隶属度函数曲线如图1所示，曲线中的转折点X_1和X_2分别取表1中严重贫瘠和肥沃两种水平的养分含量。

根据上述公式，可以计算出各种养分贫瘠化指标的隶属度值，此值大小在0.1－1.0之间。最大值1.0表示土壤养分充足，完全满足植物生长的需要；最小值0.1表示土壤养分严重缺乏，由于土壤中不可能完全没有某种养分，而且为了在计算时避免零值过多，最小值没有取零。

2. 权重的确定

各种养分贫瘠化指标的权重利用多元统计分析中的因子分析法确定。我们采用统计绘图系统软件(STATGRAPHICS)进行分析，首先求出反应养分贫瘠化状况的各因子主成分的特征值和贡献率(表2)。因为样本量大，前3个主因子的贡献率(78.5%)已能满足信息提取的要求。经因子旋转分析可知，第一个主因子主要表达有机质、全氮和全磷的贫瘠化状况，第二个主因子主要表达全钾和速效钾的贫瘠化状况，第三个主因子主要表达速效磷的贫瘠化状况。然后计算相应的载荷距阵，并求出各种养分贫瘠化指标的公因子方差，方差的大小表示了该项养分贫瘠化指标对土壤养分贫瘠化状况总体变异的贡献，最终由方差值计算各项养分贫瘠化指标的权重(表3)。

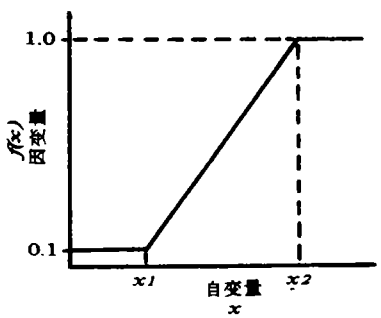

图1　S型隶属度函数曲线

3. 综合评价指标值的计算

根据加法法则，在相互交叉的同类指标间应采用加法进行合成。因此，我们提出一个反应土壤养分贫瘠化状况的综合性指标值INDI (Integrated Nutrient Depletion Index)，其计算公式如下：

$$INDI=\sum_{i=1}^{6}Wi\times Ni$$

其中Ni和Wi分别表示第i种养分贫瘠化状况指标的隶属度值和权重。

表2　养分贫瘠化状况因子主成分的特征值和贡献率

主成分	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	2.344	39.1	39.1
2	1.341	22.4	61.4
3	1.021	17.0	78.5
4	0.691	11.5	90.0
5	0.536	8.9	98.9
6	0.065	1.1	100.0

表3　各种养分指标的公因子方差和权重

指标名称	公因子方差	权重(W)
有机质	0.950	0.202
全　氮	0.961	0.204
全　磷	0.632	0.134
全　钾	0.698	0.149
速效磷	0.838	0.178
速效钾	0.627	0.133

然资源的不合理利用，特别是侵蚀增加和耕作管理失调造成土壤养分循环与平衡的严重紊乱，最终引起土壤养分的贫瘠化。

1. 森林的开垦和退化

热带、亚热带森林林冠茂密、结构层次多、根系发达，其巨大的蒸腾作用和选择吸收性能是各种养分元素运动的动力，最终通过凋落物的分解促进了土壤的“生物自肥”速率，这种生物富集过程是土壤肥力不断提高的基础。一旦开垦利用，森林即开始退化，引起水土流失增加，养分大量损失，土壤水热状况恶化，凋落物分解加快，土壤肥力退化。

研究表明，林下土壤耕垦后，土壤养分迅速降低。其中土壤有机质的下降幅度很大，氮磷钾的下降幅度较小。在从次生林演变到人工林的过程中，表土(0－20厘米)有机质下降32.4－62.9%，全氮下降25.6－42.7%，全磷下降13.3－18.2%，全钾下降15－31%[4]。将全国第3次森林资源清查(1984－1988年)资料与“五五”期间清查(1977－1980年)的资料相比，南方10省(琼、桂、粤、黔、闽、湘、赣、浙、鄂、皖)的有林地面积虽然增加了130.13万公顷，但用材林面积降低了92.56万公顷，其中成熟林面积降低91.71万公顷，说明森林资源退化，必然导致土壤养分的退化。

2. 土壤侵蚀与地表径流

土壤侵蚀是引起土壤养分降低的主要因素。随着侵蚀程度的增加，土壤有机质和全氮的含量不断下降，土壤严重缺磷。据研究，在第四纪红粘土区，每年每公顷随地表径流流失的水解氮为84.04公斤，磷(P_2O_5)为0.83公斤，钾(K_2O)为422公斤[5]。即使是林地，土壤中的元素也随地表径流不断流失，研究发现，雨林、季雨林、常绿阔叶林和人工幼林中，土壤各种元素(氧化物)每年每公顷的地表径流量分别为46.7、44.8、28.5和85.3公斤[6]。

该区目前水土流失面积为24.8万平方公里，占土地总面积的21.4%。湘赣闽桂粤5省1993年的水土流失面积比50年代增加了236.5%，比80年代增加了18.4%，50年代为5.4百万公顷，80年代为15.3百万公顷，目前为18.1百万公顷。据统计，桂、粤、闽、湘、赣、浙6省每年表土流失量为585百万吨，由此损失的土壤有机质为877.5万吨，N、P、K 等无机养分为918.5万吨，相当于6省年施肥量的2－4倍。可见，水土流失是造成本区土壤养分衰减的一个最直接和最重要的原因。

3. 淋失

淋失是一种自然过程，它引起土壤中营养元素的大量损失。试验发现，雨林、季雨林、常绿阔叶林和人工幼林中，土壤各种元素(氧化物)每年每公顷的深层渗漏量分别为61.3、69.8、34.0和23.8公斤[6]。在江西余江，无论裸地还是种植了植物的土壤，矿质元素的淋失量均较同一地区人工林下第四纪红粘土发育的红壤中的淋失量要高。不种作物时，不同质地土壤中钙、钾、镁和 NO_3—N 的平均淋失量分别为41.4、16.7、7.9和32.5公斤/公顷/年；种植作物后，淋失量明显减少，平均值分别为29.1、10.5、5.0和18.59公斤/公顷/年①。

4. 养分投入水平低、比例不合理

在高投入的条件下，土壤养分含量增加。但目前本区耕地的投入水平普遍较低，特别是有机肥投入日趋减少。根据1991年国家统计资料，该区耕地中化肥用量较高(≥400公斤/亩)的县面积仅占15.9%，主要分布在沿海地区；化肥用量中等(200－400公斤/亩)的占59.5%，分布在广大的红壤腹地；而化肥用量低(＜200公斤/亩)的占24.7%，主要分布在琼西、桂西和湘西等地。以江西省为例，耕地每亩平均亏缺约17.2公斤的有机质，需补充100公斤左右的稻草。低产稻田每亩需补充175公斤的秸杆或种植鲜草量达1000公斤以上的绿肥，才能维持有机质的平

① 沈仁芳，红壤营养元素的淋溶特征，中国科学院南京土壤研究所博士论文(资料)，1993。

衡。虽然在高产稻田中，有机质基本平衡，但如果不施有机肥，也不种绿肥，其有机质含量将迅速降低，第一年中即可下降10.4%[7]。

本区施用化肥的氮磷钾比例也不合理。目前世界上氮、磷、钾化肥的消费量比例大致为1∶1.1∶0.9($N:P_2O_5:K_2O$)，而广东、云南、湖南、浙江4省1979年的施用比例仅为1∶0.36∶0.056[8]。虽然本区磷肥施用量增加，以至一些水稻田中磷素含量已经达到过剩的水平，但大部分林旱地土壤中仍然缺磷。由于我国缺乏钾肥资源，钾素的投入明显较低，土壤缺钾现象日益突出。

(二) 土壤养分贫瘠化的防治对策

土壤养分贫瘠化是农业持续发展必须解决的诸多问题之一，这些问题相互关联、相互影响，必须应用系统论原理，从调整农村产业结构、发展农村经济开始，增加农业的整体投入，优化农业生态系统的结构，合理施肥，减少水土流失，最终达到防治土壤养分贫瘠化的目的。这些措施分为以下3个层次：

1. 在宏观层次上，以市场经济为导向，建立高度集约化、结构合理的大农业布局，协调不同区域间的资源、生态、经济的互补关系，充分发挥自然资源潜力，发展农村经济，从根本上提高农业的整体投入水平。

本区农业发展必须从沟谷型生产模式向山、丘、沟谷、平原并举立体开发型转变，从偏重粮食生产的产业结构向种养加、产供销、贸工农相结合的产业结构发展，充分利用超过现有耕地四倍以上的土地资源，发展林业，特别是建立具有一定规模的热带、亚热带经济林果生产加工基地，发展商品化的外向型经济。另一方面，本区腹地农业在西部多沿山丘环状分布，在东部则偏重于沟谷，发展水平低，资源优势未能充分发挥，宜以资源劳力密集型的产业为先导；而沿海、沿江地区经济发展迅速，交通便利，宜以资金技术密集型的产业为主，并支持带动腹地的经济繁荣。

2. 在中观层次上，兼顾生态和经济效益、长远和眼前效益，优化立体农业生态结构，开发集农林牧渔为一体的多样土地利用生态系统，提高系统资源利用率和产出率，并采用生物措施和工程措施相结合的办法，减少水土流失，提高土壤养分水平。

本区应从景观生态学角度出发，建立适合当地条件的高效益生态—经济型农林牧复合立体农业布局，特别是“顶林、腰果、谷农、塘渔”的利用模式，发挥经作、经林、果树的优势，充分利用光、热、水、土资源。

生物措施主要是采用合理的种植制度，增加地面覆盖，减少地表冲刷，增加土壤有机质含量。坡度大于10°，尤其是大于30°的陡坡必须退耕还林。当山丘上的次生林被砍伐后，在山丘中上部，必须首先保护灌木和草被，然后穴载经济林果(如速生林、食用竹等)；而在山丘的下坡与低丘岗地，可以等高种植经果经作(如柑桔、胡柚、油茶等)，特别应发展复合农林系统(如套种、间作绿肥、药材、牧草、作物等)，在防治水土流失、提高土壤养分含量的同时增加农民的经济收入。

生物措施必需和工程措施相结合，特别是在土壤严重侵蚀区的治理初期，主要依靠工程措施，如等高开垦、修筑拦水坝、挡水墙等。工程措施费用较高，费用低、见效快的一种措施是结合少、免耕技术进行地面覆盖(如秸杆覆盖、残茬覆盖、活体覆盖和塑料薄膜覆盖等)。

3. 在微观层次上，以建立土壤养分的良性循环和平衡为目标，一方面因土种植，另一方面提高养分投入水平，调节养分投入比例，并收集、优化和推广适合不同地区、不同土壤条件的施肥方法，不断提高土壤养分水平。

要保持土壤养分的良性循环和平衡，首先必需充分利用各种有机废弃物(如作物残茬、家畜粪便、城市生活垃圾等)和有益的天然生物过程(如固氮作用)，并合理施用化肥。其次，在立体大农业布局下，根据土壤的养分特性，选择适种的林木与作物品种。如红壤地区普遍缺磷、缺钾，可以选择一些耐低磷(萝卜菜、食用甜菜等)和耐低钾(白菜等)的作物。在新开垦的贫瘠土

壤上，只能种植抗逆性强的先锋植物（如马尾松、胡枝子、猪屎豆、甘薯、花生等）；然后随着土壤的不断熟化，扩大种植的范围（如油菜、豆类、烟草、中药材等）。此外，还可以采用现代生物技术，改进作物的遗传特性，以适应各种苛刻的土壤养分条件。

本区沿海地带的耕地中化肥用量较高，而广大的红壤腹地化肥用量较低，特别是琼西、桂西和湘西等地投入很低。应根据上述对土壤养分贫瘠化分布状况的评价结果，制定适合各地区的养分优先投入种类和数量。李庆逵曾建议我国化肥投入的 $N:P_2O_5:K_2O$ 比例在本世纪末能达到1:0.7:0.2[8]，而本区施用化肥的氮磷钾比例极不合理，氮多、磷钾少，特别是钾素投入亟待增加。

在施肥技术方面，各地区已有很多成功的经验，需要进行收集整理，并加以系统化和深入研究。在投入水平较高时，可以在满足作物需求的同时，不断提高土壤养分的含量及质量，但在投入水平较低时，应以改善土壤养分的品质，即以提高土壤养分中有效部分的比例为主，不应强求土壤养分含量的大幅度提高。

在施肥时还应根据实际情况定量施用，减少养分的无效投入。如在第2次全国土壤普查中整理出来的“以土定产、以产定肥”方法以及“以调控土壤供氮指标为主体的诊断施肥技术”等经验。一些研究人员在计算有机—无机肥配合施用所需的化肥用量时，提出“养分有效性系数(NAI)”的概念，即土壤有效态养分提高一个单位所需加入的有机肥养分的单位数，并建立了氮磷钾的施用量模型[9]。目前，还需要深入研究，建立一系列与此类似的适用于不同有机无机肥料、不同养分、不同土壤条件的养分投入模型。

参 考 文 献

[1] 孙波、张桃林、赵其国，我国东南丘陵区土壤肥力的综合评价，土壤学报（待刊）。

[2] 江西省土地利用管理局、江西省土壤普查办公室，江西土壤，中国农业科技出版社，481－501页，1990。

[3] 红黄壤利用改良区划协作组，中国红黄壤地区土壤利用改良区划，农业出版社，1985。

[4] 何园球，我国南方林地退化过程中的生态环境效应，土壤环境变化（龚子同主编），198－203页，中国科学技术出版社，1992。

[5] 土壤侵蚀监测研究课题组，侵蚀退化与劣地恢复，红壤生态系统研究（中国科学院红壤生态实验站编），283－360页，江西科学技术出版社，1993。

[6] 何园球、赵其国、王明珠、石华，我国热带、亚热带森林土壤养分循环特点与成土过程研究，土壤，25(6)：292－298，1993。

[7] 李忠佩、程励励，江西省耕地的有机质平衡及瘠地红壤的有机质积累研究。红壤生态系统研究（中国科学院红壤生态实验站编），230－238页，江西科学技术出版社，1993。

[8] 李庆逵，红壤开发利用过程中的肥力演变及施肥问题，中国红壤（李庆逵主编），135－144页，科学出版社，1983。

[9] 鲁如坤、时正元，农田养分的再循环研究，Ⅱ．某些有机物料养分的有效系数，土壤，25(6)：286－291，1993。