华北平原典型区土壤肥力低下区识别及限制因子分析*

张贝尔[1,2]　黄　标[1†]　赵永存[1]　孙维侠[1]　胡文友[1]　张晓光[1,2]

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京　210008)

(2 中国科学院研究生院,北京　100049)

摘　要　采用序贯高斯模拟方法对山东禹城市土壤质量指数的空间表征进行了评价,并深入分析了土壤肥力低下区的范围及其主要限制因子。结果表明,禹城市西南和中部土壤肥力质量指数较高,肥力质量较低的区域主要分布在该市北部、西北和东南三个区域。利用土壤肥力质量与产量的关系,确定禹城市土壤肥力低下的判定阈值为 0.55,该市大部分区域土壤质量指数处于该阈值以上,仅在北部、西北和东南三个相对独立的区域共有 2 494 hm^2 的耕地土壤肥力低下的风险较高。该市北部肥力低下区的主要限制因子是土壤质地和全磷含量,西北部主要受土壤盐化限制,而东南部的土壤肥力低下区则受土壤速效养分低、土壤盐化、质地较差以及土壤全氮含量不足等多个限制因子影响。

关键词　土壤质量评价;随机条件模拟;空间不确定性;华北平原

中图分类号　S159　　**文献标识码**　A

土壤是农业生态系统的基础[1]。土壤肥力质量决定了作物的产量和品质,因此,准确评价土壤肥力质量对指导农业生产及农业管理科学决策具有重要的理论和现实意义。

自从 Doran 和 Parkin[2] 提出土壤综合质量指数方法,国内外相继开展了一系列关于土壤质量评价的研究工作[3-6]。土壤质量评价指标通常具有复杂的空间变异性[7],因此,在土壤综合质量指数法基础上获取的土壤肥力质量在空间表达上也具有一定的结构性和随机性。对区域土壤肥力空间变异性的深入理解是土壤养分管理和合理施肥的基础[8],因此有必要对土壤肥力质量进行准确的空间预测并对土壤肥力低下区进行识别与分析。目前土壤肥力质量空间预测制图以及障碍区识别通常采用克里格插值方法,然而,由于克里格法具有平滑效应、不能再现已知样点的基本统计特征和空间变异结构,一些包含重要土壤信息的极端值也因为平滑作用无法被正确估计[9],会导致对障碍区识别的误判。这显然不利于土壤肥力质量空间分布的定量表征。此外,由于空间预测模型等的限制,使得由采样点来预测未采样区域土壤肥力质量的过程通常包含一定的不确定性(Uncertainty)[10-11],克里格插值只能得到一个空间分布结果,很难实现空间预测的不确定性评价。而条件模拟的方法则是利用已知采样点的统计特征和空间结构特征,产生多个等概率实现(Realization),在一定程度上克服了克里格方法的上述缺陷。条件模拟不仅能提供土壤肥力质量的空间分布模式,而且能对模拟的不确定性进行定量评价,因而也更有助于农业管理者做出精确判断和科学决策。

华北平原种植历史悠久,是我国粮食主产区,该地区粮食年总产量占中国粮食年总产量的 1/5 左右[12],随着近几十年大量的化肥投入和对中低产田的治理,该地区土壤肥力质量明显提升,但该区域也是我国土壤肥力质量变化最强烈的区域之一[13]。准确的预测该区域目前的土壤肥力空间分布,对制定相应的农业管理措施、提升土地生产力、提高粮食产量均具有重要的理论和现实意义。

* 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1 - YW - 09 - 02)和公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001 - 01)资助

† 通讯作者,E-mail:bhuang@issas.ac.cn

作者简介:张贝尔(1983—),男,安徽舒城人,博士研究生,从事土壤质量评价、土壤空间预测和不确定性分析以及地理信息系统应用等方面研究。E-mail:bellzhang@yahoo.com

收稿日期:2011 - 06 - 10;收到修改稿日期:2011 - 08 - 18

1 研究区概况及数据采集

1.1 研究区概况

山东省禹城市(36°40′~37°12′N,116°22′~116°45′E)位于山东省西北部(图1),属于黄河冲积平原,地势平缓,全市总面积990 km^2,其中耕地面积530 km^2,总人口50万左右(截止2003年)[14]。该市属于暖温带季风气候,年均温13.1℃,年均降水量593 mm,降雨多集中在6、7、8月,呈现春旱、夏涝、晚秋旱的规律。该市土壤以雏形土(97.8%)为主,盐成土分布面积较小,仅占全市总面积的2.2%[15]。禹城市是我国传统的农业区,以玉米-小麦轮作为主要种植方式,年产粮食约67万t,是我国重要的商品粮基地。禹城市的土壤、气候、耕作方式、农业水平、经济发展方式等在华北平原地区均具有较好的典型性和代表性。

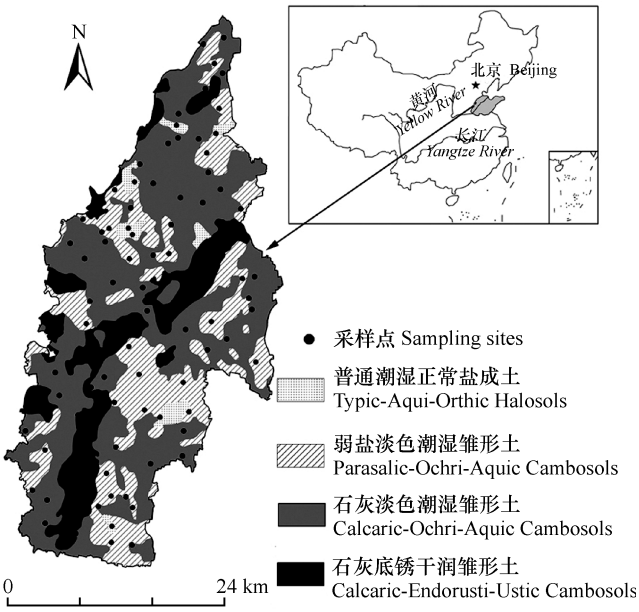

图1 研究区土壤类型分布及样点图

Fig. 1 Soil type distribution map of Yucheng County, China, including soil sampling sites

1.2 样品采集与分析

根据土壤类型、土地利用现状及粮食作物产量分布状况,采集了研究区99个表层土壤(0~20 cm)样品(图1)。为了避免作物生长期间施肥的影响,样品采集于在2008年6月当季作物(小麦)收获后、下季作物(玉米)播种前进行,采样时采用GPS记录每个采样点的经纬度,并详细记载采样点的地理位置、土地利用类型、植被、土壤类型等基础信息。土壤样品采集后在室温下风干,去除草根石块,然后过2 mm尼龙筛,装袋备用。

为全面了解禹城市土壤肥力质量状况,选取土壤质地、pH、含盐量、大量养分元素全量及有效态、微量元素有效态等方面的指标进行了分析[16-18]。为考察土壤的生产力,在99个土壤采样点对应的田块上分别于2008年9月和2009年6月进行了玉米和小麦的测产。作物经脱粒晒干后称重,分别计算玉米和小麦产量,通过累加获取该田块全年粮食单产。

2 研究方法

2.1 土壤肥力质量评价方法

本研究采用土壤肥力综合质量指数法。该方法通过四个步骤实现获取禹城市土壤肥力综合指数:(1)选择最小数据集;(2)对土壤指标进行归一化处理;(3)确定各土壤肥力指标权重;(4)计算土壤肥力质量指数(SFQI)。具体的土壤肥力质量评价方法可见相关的文献[1,19]。

2.2 土壤肥力质量指数的空间表达——序贯高斯模拟

序贯高斯模拟(sequential Gaussian simulation, SGS)是贝叶斯理论的一个应用,是条件模拟法中应用较广、理论成熟的方法之一[20]。该方法根据现有数据计算待模拟点值的条件概率分布,从该分布中随机取值作为模拟值。每得出一个模拟值,就将它连同原始数据和此前得到的模拟数据一起作为条件数据,进入下一点的模拟,因此随着模拟的进行,条件数据集合会不断扩大。其主要步骤是[21]:(1)定义一条不重复遍历所有未采样位置的随机路径;(2)对于随机路径上的一个节点i,利用克里格方法求取该节点搜索半径之内的已知节点的条件累积分布函数的参数;(3)根据分布函数抽取一个值以作为i节点的模拟值;(4)将i点获得的模拟值加入下一位置的建模中;(5)沿着该路径重复(2)~(4)获取整个路径上所有未知节点的模拟结果,即可获得一次随机模拟实现(realization)。

重复L次序贯模拟,每次模拟均使用不同的随机路径则将产生L个等概率的模拟实现。模拟的方法在重现整体统计特征的同时也建模评价了空间不确定性,这一系列的模拟实现提供了空间不确定性的可视化和定量评价的模型[22]。本研究共进行了1 000次模拟(栅格尺寸为100 m×100 m)。

2.3　不确定性评价及土壤肥力低下区的识别

土壤肥力低下区可以利用阈值加以识别，低于一定阈值的区域即被识别为土壤肥力低下区，认为该区域内土壤肥力具有明显障碍，肥力质量的低下是最主要的作物生长限制条件。基于 SGS 的土壤肥力不确定性评价为土壤肥力低下区识别提供了一个更合理的方法——即通过计算每个点在多次实现中低于某一阈值的概率，来判断该点肥力低下的可能性。

2.3.1　局部不确定性评价　　指单一空间位置上，土壤肥力质量空间表达的不确定性，即局部不确定性（local uncertainty）。即，该点土壤肥力质量低于某一阈值的概率。其计算公式如下：

$$prob\,[z(x') < z_c] = \frac{n(x')}{L_{SGS}} \qquad (1)$$

式中，L_{SGS}为模拟实现的次数，本研究中为 1 000；(x')为 x'点在 L 次模拟中小于阈值 z_c的次数。

2.3.2　空间不确定性评价　　或称多点不确定评价，是指对评价区内所有待模拟点进行不确定性联合概率评价[22]，即空间不确定性（spatial uncertainty）。给定一个临界概率值 P_c和阈值 z_c，则基于规则 $prob[z(x') < z_t] \geqslant P_c$，可确定低于一定阈值的区域 A，由于临界概率的选择差异，用该区域来描述土壤肥力低下区同样具有一定的不确定性，空间不确定性一般用联合概率来评价：

$$prod\,[z(m_1) > z_c, z(m_2) > z_c, z(m_3) > z_c, \cdots z(m_n) > z_c] = \frac{n(m_1 m_2 m_3 \cdots m_n)}{L_{SGS}} \qquad (2)$$

式中，$m_1, m_2, m_3 \cdots, m_n$为区域 A 内的点；$n(m_1 m_2 m_3 \cdots m_n)$为 L_{SGS}次模拟中，A 区域内各点土壤肥力质量指数模拟值均小于阈值的次数。本研究模拟所用的软件为 SGeMS V2.1，将其结果转为栅格后在 ArcGIS 8.3 中进行绘图。

3　结果与讨论

3.1　描述统计分析

禹城市土壤肥力质量指数和产量描述性统计（表 1）表明，该市土壤肥力质量指数和各作物单产以及全年产量水平的变异系数（CV）均在 10%～25%之间，属于中等程度变异。其中全年单产的变异系数低于小麦和玉米的变异系数，说明用全年单产水平进行计算可以消除由于作物种类不同而造成的产量差异，更好地反映样点间由于肥力水平而造成的差异。同时通过偏度（Skewness）可以发现土壤肥力质量指数和粮食产量的偏度均不大，可以近似看作是正态分布。

表 1　禹城市作物产量和土壤肥力质量指数描述性统计

Table 1　Descriptive statistics of soil fertility quality indices and crop yields in Yucheng of China

项目 Item	平均值 Mean	中值 Median	标准差 Std. D	变异系数 C. V.（%）	最小值 Min	最大值 Max	偏度 Skewness
土壤肥力质量指数 Soil fertility quality index	0.66	0.65	0.15	22.2	0.38	0.98	0.11
小麦产量 Yield of wheat（t hm^{-2}）	6.68	6.75	1.01	14.96	3.63	8.44	−0.70
玉米产量 Yield of maize（t hm^{-2}）	7.77	7.82	1.41	18.03	4.29	10.50	−0.35
年单产 Total crop yield（t hm^{-2} a^{-1}）	14.45	14.52	1.78	12.25	9.59	18.27	−0.31

3.2　土壤肥力质量指数空间分布的随机模拟与肥力低下区阈值选取

3.2.1　土壤肥力质量指数空间分布的随机模拟　　采用 SGeMS 中的 sgsim 模块对土壤肥力质量指数和年单产量空间分布分别进行序贯高斯模拟。图 2 为随机抽取的两次模拟实现图像，每次模拟实现的概率是相等的，反映了土壤肥力质量和年单产量的空间分布的可能（图 2）。从随机抽取的模拟图像可知，每次模拟反映的基本趋势是一致的。

为了考察研究区土壤肥力质量状况和粮食单产的宏观分布趋势，可以用 E-type 均值（条件均值）加以度量，E-type 均值是取 1 000 次模拟实现的平均值计算的（图 3a，图 3b）。通过条件均值图发现，禹城土壤肥力质量空间上呈现西南和中部较高，北部、西北和东南较低的趋势，而粮食产量趋势也与此基本一致。

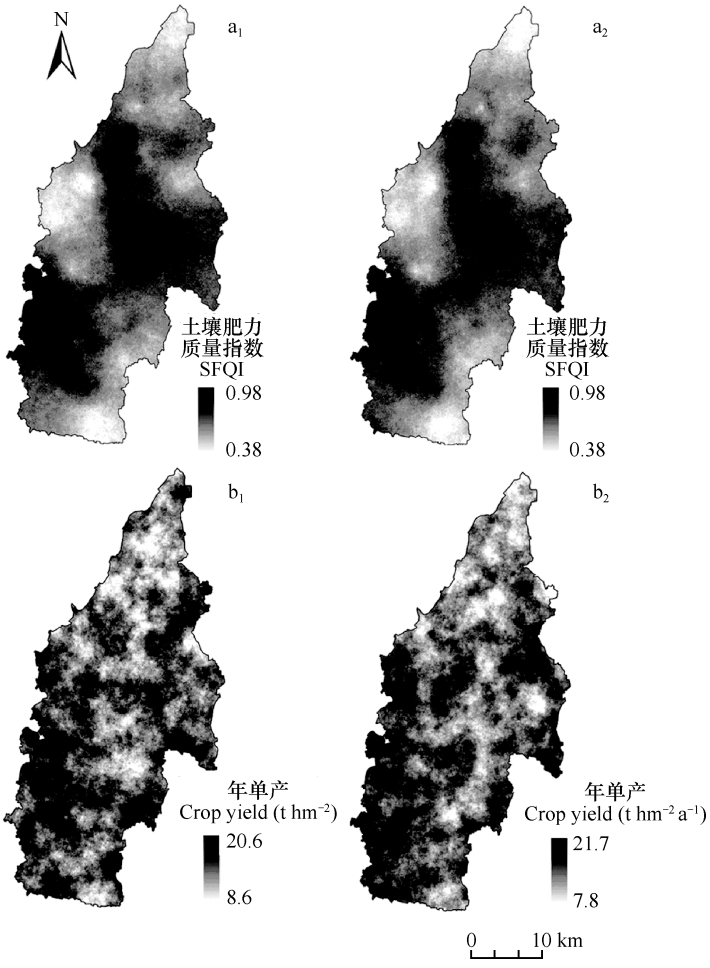

图 2 从 1 000 次模拟中随机抽取的模拟实现(a_1:土壤肥力质量指数第 100 次实现;a_2:土壤肥力质量指数第 500 次实现;b_1:年单产第 100 次实现;b_2:年单产第 500 次实现)

Fig. 2 Randomly selected runs of simulation out of 1 000 runs of simulation(a_1 stands for the 100th run of simulation of soil fertility quality index SFQI);a_2 for the 500th run of simulation of SFQI; b_1 for 100th run of simulation of crop yield;and b_2 for the 500th run of simulation of crop yield)

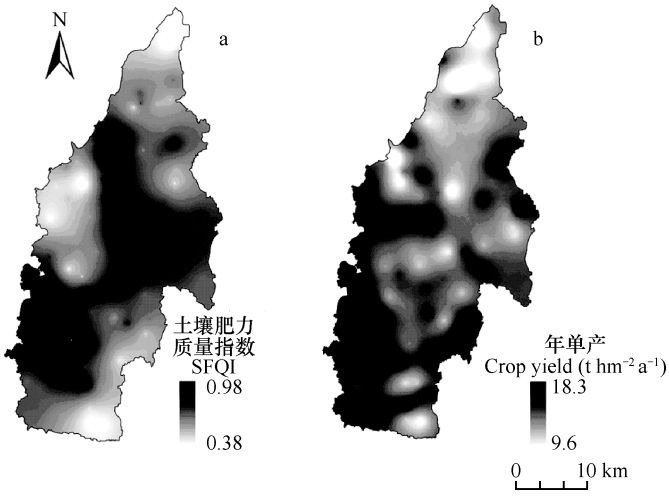

图 3 土壤肥力质量(a)和粮食作物年单产(b)E-type 均值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of E-type means of soil fertility quality(a)and crop yield(b) in Yucheng County,China

3.2.2　土壤肥力低下区阈值的获取　　土壤肥力质量指数是一个综合的质量指数而不是一个单独的指标，因此没有一个公认阈值来用以识别肥力的可能低下区。然而土壤肥力质量的差异最直接和直观的反应就是生长在不同土壤肥力质量的土壤上的作物产量的差异，因此可以建立土壤肥力质量与作物产量的关系来确定。利用研究区的土壤肥力质量和作物年单产的空间分布图，统计不同土壤肥力质量区间内作物平均年单产，可以获得如图 4 所示的散点图。

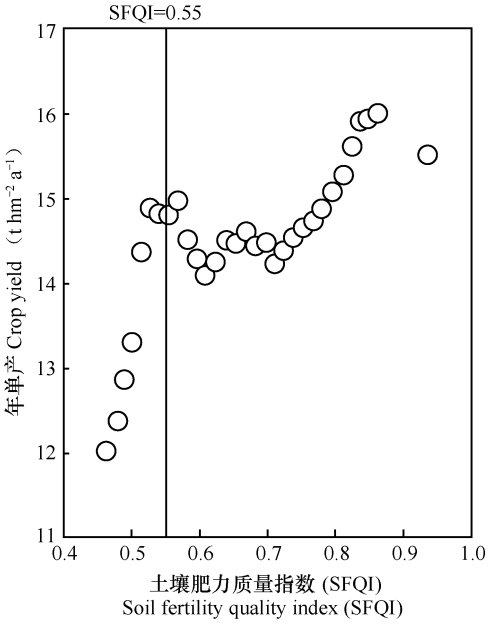

图 4　不同土壤肥力质量区间平均粮食年单产

Fig. 4　Mean crop yields in areas different in soil fertility quality

图中横坐标为土壤肥力质量指数，纵坐标为对应的年产量平均值。研究发现，在土壤肥力质量指数小于 0.55 时，随着土壤肥力质量指数的增加，年产量的平均值呈现迅速增加的趋势；而在土壤肥力质量指数大于 0.55 后，随着土壤肥力质量指数的增加，年产量平均值呈现上下波动的状况。这说明在土壤肥力质量指数小于 0.55 时，粮食产量主要受土壤肥力质量控制，增加土壤肥力可以起到很好的提高产量的效果，这些地区有肥力缺乏的风险。因此，以 0.55 作为判断土壤肥力低下与否的阈值。

3.3　不确定性分析和肥力低下区识别

3.3.1　局部不确定性评价　　对于每个栅格，多次实现的值是在一定范围内波动的，对于每个被模拟的点，基于 1 000 次的模拟可以计算每个栅格土壤肥力质量指数低于阈值 0.55 的概率（图 5）。从图中可以发现禹城大部分区域土壤肥力质量指数低于阈值的概率非常低，说明大部分区域的土壤肥力处于适宜作物生长水平，几乎没有肥力低下的风险。主要的土壤肥力质量低下高概率区分布在禹城北部、东南和西北三个独立的区域。这三个区域可能有一定土壤肥力限制因子影响到土壤肥力质量指数。

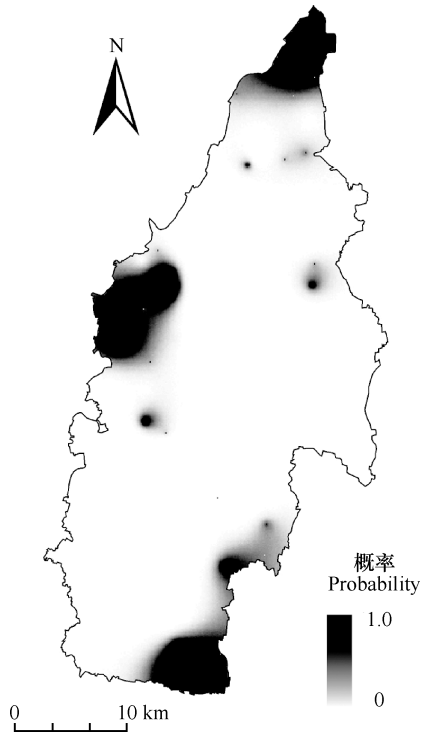

图 5　土壤肥力质量指数低于 0.55 的概率空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of the probability of soil fertility quality index being lower than 0.55

3.3.2　空间不确定性评价　　基于给定的概率阈值 P_c，利用规则 $Prob(\mathrm{SFQI} < 0.55) \geqslant P_c$，可从图 5 中获取土壤肥力存在障碍的概率大于给定概率 P_c 的区域（图 6）。从图中可以看出，随着临界概率的增加，识别出的土壤肥力低下区的面积逐渐减少。当临界概率为 0.85 时，识别出的肥力质量障碍区为 6 650 hm^2，占禹城市总面积的 6.72%，而当临界概率增加至 0.99，识别出的面积为 2 494 hm^2，占禹城市总面积的 2.52%，面积相差 2.5 倍以上，无法判断哪个概率识别出的肥力低下区是符合实际的。

因此考察了不同临界概率识别出的肥力低下区的联合概率，即该区域所有栅格均低于给定土壤肥力质量阈值 0.55 的概率。例如当临界概率为 0.85 时，共有 6 650 个栅格被识别为肥力低下区，但是这 6 650 个栅格在 1 000 次模拟中，仅有 8 次同时小于土壤肥力质量阈值 0.55，即联合概率仅为 0.008，这是非常低的概率，因此我们认为临界概率

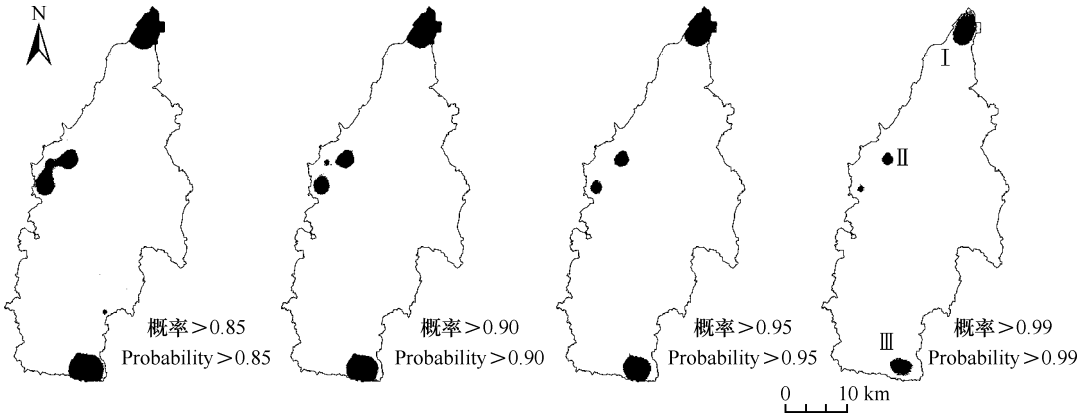

图 6 不同概率阈值获取的土壤肥力质量指数低于 0.55 的区域分布

Fig. 6 Distribution of areas <0.55 in soil fertility quality index obtained by different probability thresholds

为 0.85 识别出的肥力低下区的不确定性非常大,与实际情况相差很大,当临界概率为 0.90 和 0.95 的时候,联合概率也仅为 0.074 和 0.444,也具有较高的不确定性,但当临界概率为 0.99 时,识别出的肥障碍区为 2 494 个栅格,但这些栅格在 1 000 次模拟实现中同时小于 0.55 阈值的次数为 954 次,空间不确定性很小,比较真实地反映了禹城市土壤障碍区的分布和面积:共有 2 494 hm^2 的土壤肥力低下区,占禹城总面积的 2.52%。

3.4 肥力低下区障碍因子分析

为了因地制宜的制定农业管理和土壤肥力改良措施,除了需要了解土壤肥力低下区的分布状况外,还需要了解土壤肥力低下区的主要限制因子。为此本文将上节中识别的三个独立分布的土壤肥力质量障碍区分别命名为土壤肥力低下区Ⅰ、土壤肥力低下区Ⅱ和土壤肥力质量低下区Ⅲ。并利用主成分分析进行影响土壤质量的主要因子分析(表 2)。

表 2 禹城市土壤指标主成分分析

Table 2 Principal component analysis of soil indicators in Yucheng County

	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5
pH	0.260	-0.315	0.584	0.277	0.035
电导率 EC	0.043	-0.022	-0.800	0.075	0.031
土壤有机质含量 SOM	0.523	0.299	-0.183	-0.096	0.288
阳离子交换量 CEC	0.810	-0.041	0.154	0.052	0.056
土壤黏粒含量 Clay	0.870	-0.066	0.041	0.068	0.004
全氮 TN	-0.019	0.208	0.276	-0.170	0.783
全磷 TP	0.085	0.207	0.019	0.803	0.040
全钾 TK	0.228	0.030	0.530	-0.549	0.232
有效磷 Av-P	-0.115	0.736	-0.273	0.090	0.060
速效钾 Av-K	0.491	0.356	0.068	-0.429	-0.066
有效锰 Av-Mn	0.363	0.545	0.323	0.133	0.447
有效铜 Av-Cu	0.435	0.480	0.302	0.481	-0.013
有效锌 Av-Zn	0.074	0.796	0.047	0.065	-0.008
有效钼 Av-Mo	0.109	-0.191	-0.332	0.169	0.658
特征值 Eigenvalue	2.409	2.147	1.784	1.548	1.397
累计贡献率 Cumulative contribution(%)	17.25	32.54	45.29	56.35	66.32

其中第一主成分上土壤黏粒含量和 CEC 具有很高的荷载，可认为是反映土壤机械组成的因子，第二主成分上速效 P 和速效 Zn 具有较高的荷载，可以被看做是反映土壤速效养分的主成分，第三主成分上 EC 具有很高的负荷，可以认为是与土壤盐分含量紧密联系的主成分，而第四主成分和第五主成分上全磷和全氮分别具有较高的荷载，可以认为是反映了该地区土壤全磷全氮水平的主成分。

因子得分（factor score）是观测量在每个共性因子上的值，若是空间上一个点上的某因子得分大于零说明这个点在该因子上具有正向的贡献，而若是小于零则说明与该因子反映的土壤特征的向量方向相反，因此五个因子得分的空间预测结果反映了禹城市五种主要土壤因子的空间属性。若是利用不确定性预测的方法获取各个因子小于 0 的概率，即可得到空间上每个位置上各个因子可能存在障碍的概率。分别统计上节中获取的三个主要土壤肥力低下区各个因子得分小于 0 的平均概率，可以分析三个区域的土壤肥力主要限制因子（表 3）。

表 3　不同土壤肥力低下区内因子得分小于 0 的平均概率

Table 3　Average probability of factor scores being lower than 0 in three different low soil fertility quality areas

	因子得分小于 0 的平均概率 Average probability of factor scores being <0				
	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5
土壤肥力低下区Ⅰ Low soil fertility quality area Ⅰ	0.887	0.558	0.380	0.863	0.746
土壤肥力低下区Ⅱ Low soil fertility quality area Ⅱ	0.532	0.537	0.879	0.496	0.542
土壤肥力低下区Ⅲ Low soil fertility quality area Ⅲ	0.780	0.861	0.814	0.470	0.729

在肥力低下区Ⅰ，PC_1 和 PC_4 因子得分低于 0 的平均概率明显高于其他三个主成分，因此可以判断，禹城北部的土壤肥力低下区的土壤主要限制因子是土壤质地较差和土壤全磷含量不足；在肥力质量低下区Ⅱ，仅有 PC_3 这一个因子有很高概率低于 0，因此该区域土壤主要限制因子是土壤的盐化作用；在肥力质量低下区Ⅲ，第二主成分的因子得分低于 0 的概率最高，而第三、第一甚至第五主成分也有较高的因子得分低于 0 的概率，该区域可能具有多个土壤肥力质量限制因子，该区域土壤肥力低下受到了土壤速效养分低下、土壤盐化、质地较差以及土壤全氮含量不足等多个限制因子影响。

4　结　论

禹城市土壤肥力质量具有中等程度的空间变异，通过 1 000 次序贯高斯模拟，发现禹城市西南和中部土壤肥力质量指数较高。利用土壤肥力质量与产量的关系，确定禹城市土壤肥力是否有障碍的阈值为 0.55，利用该阈值和序贯高斯模拟，可以评价任一空间位置上土壤肥力质量指数小于该阈值的概率，而空间不确定性分析，则较真实地反映了土壤肥力低下区的分布和面积，发现禹城市有 2 494 hm^2 的土壤肥力低下区，占禹城总面积的 2.52%，且分布在禹城市北部、西北和东南三个相对独立的区域。其中北部肥力低下区主要限制因子是土壤质地和土壤全磷含量，西北部主要限制因子是土壤盐化，而东南部的土壤肥力低下区则是受到了土壤速效养分低下、土壤盐化、质地较差以及土壤全氮含量不足等多个限制因子影响。

参 考 文 献

[1] 曹志洪，周健民. 中国土壤质量. 北京：科学出版社，2008：4. Cao Z H, Zhou J M. Soil quality of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008: 4

[2] Doran J W, Parkin B T. Defining and assessing soil quality// Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment. WI, USA: SSSA, 1994: 3—21

[3] Andrews S S, Mitchell J P, Mancinelli R, et al. On-farm assessment of soil quality in California's central valley. Agronomy Journal, 2002, 94: 12—23

[4] Qi Y, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma, 2009, 149: 325—334

[5] 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. 土壤学报，1995，32(4)：362—369. Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Comprehensive evaluation of soil fertility in the hilly and mountainous region of Southeastern China (in Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1995, 32(4): 362—396

[6] 张华，张甘霖，漆智平，等. 热带地区农场尺度土壤质量现状的系统评价. 土壤学报，2003，40(2)：186—193. Zhang

H, Zhang G L, Qi Z P. Systematic assessment of soil quality at farm level in tropical area of China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 186—193

[7] Stutter M I, Deeks L K, Billett M F. Spatial variability in soil ion exchange chemistry in a granitic upland catchement. Soil Sci Soc Am J, 2004,68:1 304—1 314

[8] Franzen D W, Hofman V L, Halvorson A D, et al. Sampling for site-specific farming: Topography and nutrient considerations. Better Crop, 1996, 80: 14—18

[9] Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. New-York: Oxford University Press, 1997

[10] Zhao Y C, Xu X H, Darilek J L, et al. Spatial variability assessment of soil nutrients in an intense agricultural area, A case study of Rugao County in Yangtze River Delta Region, China. Environ Geol, 2009, 57: 1 089—1 102

[11] 赵永存, 孙维侠, 黄标, 等. 不同条件模拟方法定量土壤镉含量预测的不确定性研究. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 139—146. Zhao Y C, Sun W X, Huang B, et al. Comparison of sequential indicator simulation and sequential indicator co-simulation for quantifying the local uncertainty of soil Cd content (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(1): 139—146

[12] 刘昌明, 周长青, 张士峰, 等. 小麦水分生产函数及其效益的研究. 地理研究, 2005, 24(1): 1—10. Liu C M, Zhou C Q, Zhang S F, et al. Study on water production function and efficiency of wheat (In Chinese). Geographical Research, 2005, 24(1): 1—10

[13] Chen J, Yu Z R, Ouyang J L, et al. Factors affecting soil quality changes in the North China Plain: A case study of Quzhou County. Agricultural Systems, 2006, 91: 171—188

[14] 国家统计局农村社会调查总队. 中国县(市)社会经济统计年鉴(2004). 北京:中国统计出版社, 2005. National Bureau of Statistics of China, Rural Investigation Team. China county statistical yearbook (2004) (In Chinese). Beijing: China Statistic Press, 2005

[15] 禹城县土壤调查办公室. 禹城县土壤志. 山东, 1985. Soil Survey Office of Yucheng County (SSOYC). Description of soil in Yucheng County (In Chinese). Shandong, 1985

[16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000

[17] Gee G W, Bauder J W. Particle-size analysis // Page A L, Miller R H, Keeney D R. Methods of soil analysis. Part 1-Physical and mineralogical methods. Madison, WI: ASA and SSSA, 1986: 383—411

[18] Nelson D W, Sommers LE. Total carbon, organic carbon, and organic matter //Page A L, Miller R H, Keeney D R. Methods of soil analysis. Part 2-Chemical and microbiological properties. Madison, WI: ASA-SSSA, 1982: 539—594

[19] Zhang B E, Huang B, Darilek J L, et al. Soil quality evaluation and its relationship to soil productivity in a major grain-producing region of the North China Plain.

[20] 冯益明, 唐守正, 李增元, 等. 应用序列指示条件模拟算法模拟森林类型空间分布. 生态学报, 2004, 24(5):946—962. Feng Y M, Tang S Z, Li Z Y, et al. Simulation of spatial distribution pattern of forest types by using sequential indicator simulation (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 946—962

[21] Deutsch C V, Journel A G. GSLIB, Geostatistical software library and user's guide. New York: Oxford University Press, 1998

[22] 赵永存, 黄标, 孙维侠, 等. 张家港土壤表层铜含量空间预测的不确定性评价研究, 土壤学报, 2007, 44(6): 976—981. Zhao Y C, Huang B, Sun W X, et al. Uncertainty assessment of the spatial patterns of copper contents in topsoil in Zhangjiagang City, China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 976—981

IDENTIFICATION OF AREAS LOW IN SOIL FERTILITY AND ANALYSIS OF THEIR LIMITING FACTORS IN THE REGION TYPICAL OF THE NORTH CHINA PLAIN

Zhang Beier[1,2] Huang Biao[1†] Zhao Yongcun[1] Sun Weixia[1] Hu Wenyou[1] Zhang Xiaoguang[1,2]

(1 *Soil Environment and Pollution Remediation Laboratory*, *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract To perform sustainable land use management, it is essential to predict accurately spatial distribution of soil fertility quality and identify problem areas in soil fertility quality. Based on the soil fertility quality data of a total of 99 samples of topsoil (0 ~ 20 cm) from Yucheng City, the sequential Gaussian simulation (SGS) method was applied to a conditional stochastic simulation in this paper to quantitatively assess the uncertainty of spatial distribution prediction of soil fertility quality and identify problem areas in soil fertility quality. Results show that the southwestern and the central parts of Yucheng City are higher than the northern part, the northwestern and the southeastern parts in soil fertility quality. By making use of the relationship between soil fertility and crop yield, the threshold value for identifying problem areas

in soil fertility quality is determined to be 0.55. The soil quality indices of most parts of the city are beyond the value. Using this cutoff value and the spatial uncertainty assessment, only a total of 2 494 hm^2 of land is identified as problem area. The main limiting factors are soil texture and low soil total phosphorus content in the northern part of the study area, soil salinization in the northwestern part, and low soil nutrient availability nutrient, soil salinization, poor soil texture and low soil total nitrogen content.

Key words　Soil quality evaluation; Conditional stochastic simulation; Spatial uncertainty; The North China Plain