DOI: 10.5846/stxb201810072156

陈剑, 瞿明凯, 王燕, 万梦雪, 黄标, 赵永存. 长三角平原区县域土壤磷素流失风险及其空间不确定性的快速评估. 生态学报, 2019, 39(24): 9131-9142.

Chen J, Qu M K, Wang Y, Wan M X, Huang B, Zhao Y C.Rapid assessment of soil phosphorus loss risk and its spatial uncertainty in county areas of the Yangtze River Delta Plain. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24):9131-9142.

长三角平原区县域土壤磷素流失风险及其空间不确定 性的快速评估

陈 剑1,2,瞿明凯1,*,王 燕1,万梦雪1,2,黄 标1,赵永存1

- 1 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008
- 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:磷素是水体富营养化的关键限制因子,其中从农田土壤中流失的磷往往是水体磷素的主要来源。然而,土壤磷素的流失风险不仅与土壤磷素水平直接相关,其他环境因子,如距受纳水体距离、磷肥施用量、地表径流潜力等也强烈影响其流失风险。同时,基于有限样本预测得到的流失风险必然具有一定的空间不确定性。以长三角典型县域金坛区为研究案例,首先结合多个环境因子构建快速磷指数(RPI)评估模型,再利用稳健地统计学方法识别土壤全磷的空间离群值,并利用序贯高斯模型(SGS)模拟土壤全磷可能的空间分布格局,最后将其多个可能的模拟结果及上述主要因子输入到 RPI 模型,用以快速评估土壤磷素流失风险及其空间不确定性。结果显示,金坛区土壤磷素流失的高风险区和土壤全磷高值区分布格局在研究区北部、中部具有一定的相似性,而在中西部的旱地区两者出现差异性。高风险区主要沿着河流呈现条带状及斑块状分布,较高及以上风险区(快速磷指数值大于 0.93)的面积占金坛区面积的 65.88%。概率阈值分别设定为 0.50、0.75、0.85、0.95 时,其超标面积占金坛区总面积分别达到 16.71%、5.74%、2.84%、1.04%。引入多个相关环境因子并结合经稳健处理的 SGS 进行流失风险指数的空间模拟和不确定性评估,可以快速评估区域农田土壤磷素流失风险及不确定性,进而为区域土壤磷素调控提供必要的空间决策支持。关键词:土壤磷素;稳健地统计学;序贯高斯模拟;流失风险;关键源区;不确定性

Rapid assessment of soil phosphorus loss risk and its spatial uncertainty in county areas of the Yangtze River Delta Plain

CHEN Jian^{1,2}, QU Mingkai^{1,*}, WANG Yan¹, WAN Mengxue^{1,2}, HUANG Biao¹, ZHAO Yongcun¹

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Phosphorus is a key limiting factor for the eutrophication of water bodies. The phosphorus migrating from farmland soils is commonly recognized as the main source of phosphorus in water bodies. Therefore, a better understanding of the loss risk and its spatial uncertainty of soil phosphorus are important for the decision maker to regulate the loss of soil phosphorus at the local and regional scale. In this study, a total of 259 farmland topsoil samples (0—20 cm) was collected from the Jintan District, Changzhou City, Jiangsu Province, for the analysis of soil total phosphorus contents. Apart from soil total phosphorus, we introduced other environmental factors, such as the distance from receiving water body, phosphate fertilizer application rate, and surface runoff potential, into the assessment of the loss risk of soil phosphorus. Furthermore, the prediction of risk indices based on limited samples inevitably has certain spatial uncertainty. Here, a rapid phosphorus

基金项目:国家自然科学基金项目(41771249);国家科技支撑计划课题(2015BAD06B02-2);南京土壤研究所"一三五"计划和领域前沿项目(ISSASIP1623);中国科学院青年创新促进会(2018348)

收稿日期:2018-10-07; 网络出版日期:2019-09-17

^{*}通讯作者 Corresponding author. E-mail: qumingkai@issas.ac.cn

index (RPI) assessment model was firstly constructed based on the multiple environmental factors introduced above. And then, the robust geostatistical methods were applied for identifying possible spatial outliers of soil phosphorus data, and the sequential Gaussian simulation (SGS) model with the dataset being removed the spatial outliers was used to simulate the possible spatial distribution pattern of soil total phosphorus. Finally, multiple equiprobable realizations of soil total phosphorus and related environmental factors were input into the RPI model to evaluate the risk of soil phosphorus loss and represent associated spatial uncertainty. The results showed that the high-risk areas of soil phosphorus loss were mainly located in the eastern and middle parts of the Jintan District, which were similar with the high-value areas of soil total phosphorus. The dryland soil total phosphorus located in the mid-west of the study area was relatively low, while the loss risk of soil phosphorus was still at a high level. Such spatial distribution patterns of soil phosphorus loss risk were mainly caused by agricultural inputs. Moreover, the environment factors (i.e., the distance from receiving water body, surface runoff potential, etc.) in these areas were also favorable for soil phosphorus loss. The areas with high level risk of soil phosphorus loss represented zonal distribution along the rivers in the study area. The highest risk area with RPI value exceeding 1.06 made up 24.94% of the study area, whereas the high-risk area (RPI value from 0.93 to 1.05) was relatively larger, accounting for an area percentage of 40.94%. Overall, the risk of soil phosphorus loss was high across the study area. In the process of the uncertainty assessment, the critical threshold value was set to be 1.06 for identifying the highest risk area. When the critical probabilities were set to be 0.50, 0.75, 0.85, and 0.95, respectively, the area exceeding the critical threshold value accounted for 16.71%, 5.74%, 2.84%, and 1.04% of the total area of Jintan District. The critical probability of rapid phosphorus index value exceeding the threshold value was greater than 85% in the north area, and around the Taohu Lake. We introduced environmental factors (the distance from receiving water body, phosphate fertilizer application rate, surface runoff potential) to assess the soil phosphorus loss, which can assess the spatial uncertainty of soil phosphorus loss at a county scale quickly. The knowledge of spatial uncertainty is helpful for the decision maker to delimit the critical source areas and regulate the regional soil phosphorus loss.

Key Words: soil phosphorus; robust geostatistical methods; sequential Gaussian simulation; loss risk; critical source areas; spatial uncertainty

土壤磷素是作物生长的主要营养元素,同时也是水体富营养化的关键限制因子^[1-5]。由于农田土壤磷素具有较强的空间变异性,而且影响磷素流失的环境因子较多,因此对其流失进行控制和治理难度较大,需耗费大量的人力、物力和财力^[6]。许多研究结果显示,在土壤磷素向水体输出的过程中,少数景观单元输出的磷素往往占了整个流域污染负荷的大部分,这些景观单元则被称为土壤磷素流失的关键源区^[7](Critical Source Areas, CSAs)。而对土壤磷素污染展开风险评估和 CSAs 的划定或识别,是高效治理污染的关键^[8]。在众多的评估方法中,磷指数法(Phosphorus Index,PI)因其简便实用,且评估结果具有较好可视性的特点而得到了广泛的运用。但传统的 PI 在评估过程中,对各影响因子提前分等定级,具有一定的人为主观性。而且在县域尺度下的多数评估未考虑研究区域特征,评估要求的数据量大,过程复杂。

对于现有的 PI 法评估,往往未考虑土壤磷素具有较强的空间变异性,且忽视了预测结果的空间不确定性。区域土壤磷素浓度水平的高低往往直接影响其流失风险程度^[9-14]。土壤全磷含量通常用于衡量区域土壤磷素的本底水平^[15-16]。地统计学模型通常被用于区域土壤属性的空间预测。然而,基于有限样本点预测得到的土壤全磷空间分布必然存在一定的空间不确定性^[17]。传统的地统计学插值模型只能得到唯一的预测结果,故不能反映这一不确定性特征。而且,区域土壤数据集可能含有一定数量的离群值,这些往往会对传统地统计学模型预测精度产生一定影响。构建稳健不确定性模拟方法以去除离群值对模拟结果的影响,且能产生多个可能的空间模拟实现。这些模拟实现可以输入土壤磷素流失风险评估模型,进一步评估其流失风险及相应的不确定性。除了区域土壤全磷含量,土壤磷素的流失风险还与其他环境因子密切相关,如距受纳水体

距离、地表径流潜力、土壤侵蚀潜力、磷肥施用量等[18-28]。

磷肥的施用是土壤磷素的一个重要外源输入,县域尺度下磷肥的施用量主要和土地利用类型相关;虽然磷素在不同性质的下垫面迁移过程中衰减机制尚具有较大的差异^[29],但磷素在迁移过程中不断被截留和稀释,距离受纳水体较远的磷素源区比距离较近的源区贡献量小,因此距离因子可在一定程度上表征土壤磷素在迁移过程中随着距离衰减的规律;县域尺度下地表径流量主要由径流系数决定,径流系数与土地利用类型密切相关^[30]。由于长三角农田水利设施完善,排水沟渠及挡土墙可有效防治土壤侵蚀,故本研究针对土壤侵蚀不予考虑。

本研究以长三角典型县域金坛为研究区,具体目的在于:(1)采用经稳健处理的序贯高斯模型(RSGS)模拟金坛区土壤全磷可能的空间分布格局,并采用独立验证点,与传统序贯高斯模拟模型(SGS)的模拟精度进行对比,以验证 RSGS 在提高磷素空间模拟精度方面的有效性;(2)结合相关环境因子(即磷肥施用量、距受纳水体距离、地表径流潜力)构建快速磷指数(RPI)评估模型;(3)评估长三角典型县域土壤磷素的流失风险及其空间不确定性,并识别土壤磷素流失的关键源区。本研究以期从"不确定性"角度为区域土壤磷素的调控,划定更符合实际限制条件的管控区域。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究选取长江三角洲典型农业区金坛区(31°33′42″—31°53′22″ N,119°17′45″—119°44′59″ E)作为研究区域(图 1)。其地处江苏省南部,茅山东麓,是南京、上海和杭州三角地带的中心。全区总面积约 975 平方公里,平均海拔 13m。金坛区内水网密布,水域面积达 194.22km²,境内有大小河流 216 条,总长 512km。东南部的洮湖(长荡湖)是江苏省十大淡水湖之一。金坛区属北亚热带季风区,雨热同季,四季分明;雨量充沛,年平均降雨量为 1063.5 mm;日照充足,年平均气温为 15.3 ℃,无霜期长达 228d,年平均湿度为 78%。区内农用地类型单一,主要为水田和旱地,农田水利工程完善,排水沟渠及挡土墙可有效防治土壤侵蚀,但密集的沟渠亦是地表径流磷素流失的快速通道,有利于土壤磷素的迁移。金坛区部分区域化肥施用量大,全年每亩农田化肥施用量达 112.5 kg,其中水稻全年每亩施肥量约是全国平均水平的 3.7 倍[31]。该区主要粮食作物为水稻和小麦,是太湖地区重要的粮食生产基地之一。

1.2 评价因子的来源与处理

(1)土壤全磷

金坛区内共采集土壤样点 259 个(图 1),采样时间为 2016 年 5 月底(即小麦收割后至水稻栽种前)。采集每个样点周围 100 m^2 范围内 4—5 处表层(0—20 cm)土样,均匀混合后缩分至 1—2 kg 用于实验室分析,每个样本点采用 GPS 定位并记录其详细信息。所有样本在室温(20—22 $^{\circ}$ C)风干后去除杂物及碎石,磨细,过 100 目筛,收集 50 g 土样用于土壤全磷的测定。土壤全磷采用 $\mathrm{HClO_4}$ - $\mathrm{H_2SO_4}$ 消煮,钼锑抗比色法测定。具体分析方法参见鲁如坤[32]。

(2)环境因子

用于评估长三角典型县域金坛区土壤磷素流失风险的三个重要环境因子为磷肥施用量因子、采样点距受纳水体距离因子及地表径流潜力因子。磷肥施用量以 2014 年、2015 年和 2016 年金坛区的统计年鉴为依据,以三年磷肥施用量平均值计算,其中旱地磷肥施用量以水田的 2.5 倍计 $^{[33]}$,其他土地利用类型均考虑为无肥区,单位面积的磷肥施用量因子由金坛区磷肥施用总量和水田、旱地的面积比来获取;采样点距受纳水体的距离则通过金坛区内水系矢量数据(1:25~万)采用近邻分析方法得到;地表径流潜力可采用径流深 R(cm)来度量,其计算公式如下:

$$R = p \cdot \alpha \tag{1}$$

式中,p 表示年降雨量(cm); α 表示年径流系数。

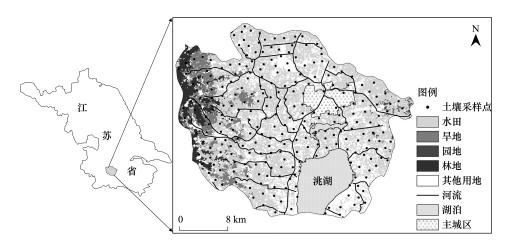


图 1 金坛区土地利用类型及土壤采样点分布图

Fig.1 Map of study area, land-use types, and soil sampling sites in Jintan District

本研究中,考虑到县域尺度内降雨量区域差异相对较小,地表径流主要受年径流系数 α 的影响。因此, 本研究根据金坛区的特点和相关研究来确定该区域不同土地利用类型下的平均径流系数(见表 1)。

表 1 不同土地利用类型的地表径流系数[34]

Table 1 The surface runoff coefficient for different land use types [34]

土地利用类型 Land use types	地表径流系数 Surface runoff coefficient	土地利用类型 Land use types	地表径流系数 Surface runoff coefficient
水田 Paddy field	0.55	园地 Orchard	0.52
旱地 Dry farmland	0.57	城镇用地 Urban land	0.90
林地 Woodland	0.48		

1.3 稳健半方差估计识别空间离群值

在满足本征假设下,传统的半方差函数 $\gamma(h)$ 的计算公式为[35]:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[z(x_i + h) - z(x_i) \right]^2$$
 (2)

式中: $\gamma^*(h)$ 为半方差函数 $\gamma(h)$ 的估计值; h 为样本间距; N(h) 为间隔距离为 h 的样本观测点对数; $Z(x_i + h)$ 和 $Z(x_i)$ 分别为区域化变量 Z(x) 在位置 $x_i + h$ 和 x_i 处的预测值。

传统半方差函数容易受到样本离群值的影响,为减小土壤全磷样本离群值对其影响,本研究采用稳健方法识别土壤全磷样本数据可能的空间离群值。其中稳健半方差主要有 Cressie and Hawkins's^[36]估计, Dowd's^[37]估计以及 Genton's^[38]估计。而选择最优的稳健方法是识别空间离群值的关键。我们通过普通克里格的交叉验证方法来判别传统半方差和三种稳健半方差预测的优劣,其计算公式如下:

SSPE
$$(x_i) = \frac{\{\hat{s}(x_i) - s(x_i)\}^2}{\sigma_{OK}^2(x_i)}$$
 (3)

式中: $\hat{s}(x_i)$ 为普通克里格在采样点 x_i 处的预测值, $s(x_i)$ 为在采样点 x_i 处的实测值, $\sigma_{OK}^2(x_i)$ 为普通克里格的方差。SSPE(x_i) $^{[39]}$ 为定义的一个统计量,通过判别 SSPE(x_i) 的中位数与 0.455 的接近程度来度量不同稳健方法的优劣。对于具体某个稳健方法,SSPE(x_i) 的中位数越接近 0.455,其半方差参数估计便更优。

对于最优的稳健半方差普通克里格预测,我们通过标准误 $\varepsilon_s(x_i)$ 来识别可能的空间离群值,其计算公式如下:

$$\varepsilon_s(x_i) = \frac{\hat{s}(x_i) - s(x_i)}{\sigma_{oK,i}} \tag{4}$$

式中: $\hat{s}(x_i)$ 为采用最优稳健半方差的普通克里格在采样点 x_i 处的预测值, $s(x_i)$ 为在采样点 x_i 的实测值, $\sigma_{OK,i}$ 为最优稳健普通克里格预测的标准差。 $\varepsilon_s(x_i)$ 为在采样点 x_i 处的标准误,在 95%置信区间内,若 $\varepsilon_s(x_i)$ 小于–1.96 便被判定为高空间离群值,大于 1.96 便被判定为低空间离群值[40]。

1.4 序贯高斯模拟

序贯高斯模拟 (Sequential Gaussian Simulation, SGS) 是一种对连续变量进行随机模拟的地统计学方法。 SGS 根据现有样本数据计算待模拟点值的条件概率分布,从该分布中随机抽取一个值作为模拟实现,每得到一个模拟值,就把它连同原始数据、模拟数据一起作为条件数据代入到下一点的模拟,该模型能产生多个可能的空间分布格局,有效避免普通克里格插值结果的平滑效应^[41]。为降低样本离群值对土壤全磷 SGS 结果的影响,我们首先通过稳健半方差函数来剔除空间离群值,再对剩下的样本数据进行 SGS。对整个金坛区划分成规则模拟格网(200 m×200 m)后, SGS 的基本步骤^[17,42]为:

- (1)确定一条访问每个网格节点一次的随机路径:
- (2)对随机路径上的一个节点 x_0 ,利用样本数据的方差函数和简单克里格方法求取该节点搜索半径内已知节点的高斯条件累积分布函数(ccdf)的参数(平均值和方差);
- (3) 从求得的 ccdf 中随机抽取一个值作为 x_0 节点的模拟值,将 x_0 节点处的模拟值加入到条件数据集中用于下一网格节点 x_1 的模拟;
- (4)沿着该随机模拟路径重复步骤(2)—(4)获取整个路径上所有网格节点的模拟结果,即可获得一次随机模拟实现。

为了产生 500 个等概率模拟实现,上述步骤应采用不同的随机路径来模拟。基于土壤全磷的 500 个可能的空间模拟实现,可计算对应的 500 个可能的土壤磷素流失风险值的模拟实现。

1.5 模型评估标准

从 259 个土壤样本点中随机抽取 20%样本(52 个)作为模型精度验证数据集,用于对比两种 SGS 模拟的 E-type 估计精度。分别计算验证点处土壤全磷的实测值与两种随机模拟方法产生的 E-type 估计之间的平均 预测误差(ME)、均方根误差(RMSE)及 Pearson 相关系数(r),其中 ME 和 RMSE 计算方法如下:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [z(u) - z^{*}(u)]$$
 (5)

RMSE =
$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [z(\mathbf{u}) - z^*(\mathbf{u})]^2}$$
 (6)

式中:n 为验证点数目; z(u) 和 $z^*(u)$ 分别为验证点 u 处土壤全磷的实测值和预测值。较高的 r 和较低的 ME、RMSE 代表更高的预测精度。

RSGS 较传统 SGS 的 E-type 估计结果的相对提高指数(RI)为:

$$RI = 100 \times \frac{RMSE_{SGS} - RMSE_{RSGS}}{RMSE_{SGS}}$$
(7)

式中:RMSER_{SCS}和 RMSE_{SCS}分别为 RSGS 方法和传统 SGS 方法的均方根误差。若 RI 为正,则表示 RSGS 的 E-type 估计较传统 SGS 的 E-type 估计具有更高的精度,反之,则 RSGS 的 E-type 估计预测精度低于 SGS 方法^[43]。

1.6 土壤磷素流失风险评估模型及风险划分

由于长三角典型县域金坛区具有农田水利设施完善、多为平原等特点,土壤侵蚀对土壤磷素流失的影响较弱,本研究对其不予考虑。我们基于传统的磷指数法^[6,14]构建快速磷指数评估模型来计算研究区的土壤磷素流失风险指数,其模型计算公式如下:

$$RPI(u) = \frac{P(u)\beta 1 + F(u)\beta 2}{D(u)\beta 3} \times \alpha(u)\beta 4$$
(8)

式中,RPI(u) 表示土壤采样点 u 处的快速磷指数值;P(u) 表示土壤采样点 u 处的土壤全磷浓度;F(u) 为土壤采样点 u 处的磷肥施用量,同一土地利用类型的磷肥施用量相同;D(u) 为土壤采样点 u 处到受纳水体的最短距离; $\alpha(u)$ 是空间位置 u 处的径流系数; $\beta1$ 、 $\beta2$ 、 $\beta3$ 、 $\beta4$ 分别为土壤全磷浓度、磷肥施用量、距受纳水体距离、径流系数的权重,参见 Sharply、张淑荣^[6-7]等人的研究,本研究 $\beta1$ 、 $\beta2$ 、 $\beta3$ 、 $\beta4$ 分别取值为 1、0.75、1、0.5。P(u)、F(u)、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0、D(u)0 为归一化处理,无量纲。

本研究采用自然间断点分级法^[44](Jenks)进行土壤磷素流失风险的分级,将金坛区分为为低风险区、较低风险区、较高风险区和高风险区。

1.7 不确定性评估

具体空间位置 u 处 RPI 值的超标概率为在位置 u 的 RPI(u) 高于给定临界阈值 c 的概率。该概率计算方法为:

$$P[RPI(u) > c] = \frac{n(u)}{500}$$
(9)

式中,500 为模拟的土壤磷素流失风险值的次数; RPI(u) 是空间位置 u 处的 RPI 值; c 是给定的临界阈值,即以自然间断点分级法划定为高风险所对应的值作为本研究的临界阈值; n(u) 是位置 u 上产生的模拟值高于给定阈值 e 的个数。

1.8 数据处理

常规统计分析在 SPSS 24.0 中完成。稳健半方差拟合及离群值筛选采用 R 软件。RSGS、近邻分析及空间制图通过 ArcGIS 10.3 完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤全磷的描述性统计

金坛区不同土地利用类型(即水田、旱地和其他用地)下土壤全磷的描述性统计量见表 2。金坛区水田土壤全磷介于 0.19—2.97 g/kg,其均值为 0.74 g/kg;旱地土壤全磷介于 0.27—0.98 g/kg,其均值为 0.59 g/kg。金坛区表层(0—20 cm)土壤全磷平均值为 0.67 g/kg,高于第二次土壤普查时耕层土壤全磷平均含量(0.50 g/kg),表明该区域在长期磷肥的施用下土壤全磷在地表已产生一定程度的积累。变异系数的大小反映区域土壤属性受地形、土地利用及不同耕作方式等因素影响的分布不均匀程度^[45]。本研究中水田、旱地、其他用地的土壤全磷空间变异系数分别为 52.24%、30.51%和 43.24%,表明金坛区的土壤全磷变化受内部因素和外部因素的共同作用,存在中等强度的变异性^[46]。

表 2 金坛区不同土地利用类型下土壤全磷描述性统计量

	土地利用类型 Land use types	样本数 Counts	极小值 Minimum	极大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
土壤全磷/(g/kg)	水田	181	0.19	2.97	0.74	0.39	52.24
Total phosphorus	旱地	50	0.27	0.98	0.59	0.18	30.51
	其他用地	28	0.18	0.87	0.37	0.16	43.24
	总计	259	0.18	2.97	0.67	0.35	51.47

Table 2 Descriptive statistics of soil total phosphorus for different land use types in Jintan District

2.2 稳健半方差模型参数及基于最优稳健半方差的空间离群值的筛选

土壤全磷经对数转换的四种半方差拟合参数见表 3。与传统的 Matheron 估计对比可知,三种稳健估计的 块金值,基台值均低于 Matheron 估计,这可能是传统实验半方差函数 Matheron 估计量 $\gamma^*(h)$ 是基于偏差的 平方,对离群值较敏感,不具有稳健性。所以当结果中出现离群值时,可能会高估实验半方差函数值。

四种半方差交叉检验的统计量 $SSPE(x_i)$ 的中位数见表 4。传统的 Matheron 估计得到的 $SSPE(x_i)$ 的中

位数明显低于 0.455。其中 Dowd 稳健估计,经交叉检验得到的 $SSPE(x_i)$ 的中位数为 0.454,最接近目标值 0.455。因此我们基于 Dowd 估计进行空间离群值的筛选。依据公式(4),我们共识别出 9 个土壤全磷的空间 离群值,这些离群值不参与后续的 SGS。

块金系数 $C_0/(C_0+C)$ 表示随机因素部分引起的空间异质性占系统总变异的比重,反映了区域土壤性质空间相关性的强弱^[47]。若 $C_0/(C_0+C)$ 小于 25%,则表现为强的空间相关性;在 25%—75%之间,则存在中等强度的空间相关性;而大于 75%,则表示空间相关性较弱。基于最优稳健的 Down 估计所拟合模型的块金系数为 49%,属中等强度空间自相关性,这是因为区域土壤养分分布是由结构性因素(如气候、母质、地形、土壤类型等)和随机性因素(如耕作措施、种植制度等)共同作用的结果。变程反映了变量空间自相关范围的大小,当观测值之间的距离小于该值时,说明它们之间存在一定的相关关系,若大于该值,则说明它们之间是相互独立的。本研究中所拟合模型的变程为 8.5 km,一定程度上可反应在变程范围内,土壤全磷表现出中等强度的空间自相关关系。本研究中土壤全磷的这种空间结构特征可能与区域种植制度有关,在相似气候与地形的长三角县域尺度下,研究区内相对一致的种植制度使得农田管理和养分的投入长期保持稳定,因此土壤全磷的空间分布表现出一定的规律性。

表 3 土壤全磷基于四种半方差估计的的变异函数参数

Table 3 The semi-variogram model parameters of log-transformed soil total phosphorus data estimated by four estimators of variograms

土壤属性 Soil property	半方差估计 Estimators of variograms	模型 Model	块金 Nugget C ₀	基台值 Sill C ₀ +C	块金系数 Nugget coefficient $C_0/(C_0+C)$	变程 Range/km a
全磷(对数转换)	Matheron	指数模型	0.1081	0.18	0.61	5.00
Total phosphorus	Genton		0.0943	0.16	0.58	6.00
(Log-transformed)	Cressie-Hawkins		0.0914	0.17	0.54	7.00
	Dowd		0.0738	0.15	0.49	8.50

表 4 基于四种半方差模型的交叉检验的统计量 $SSPE(x_i)$ 的中位数

Table 4 The media values of $SSPE(x_i)$ from cross-validation based on four variogram models

	Matheron	Genton	Cressie-Hawkins	Dowd
全磷(对数转换) Log-transformed total phosphorus	0.387	0.422	0.488	0.454

2.3 模拟精度对比

如表 5 所示,52 个验证点处土壤全磷采用 SGS 的 E-type 估计的 ME、RMSE 以及相关系数 r 分别为 0.06、0.28 和 0.68,而采用 RSGS 的 E-type 估计的 ME、RMSE 分别为 0.03、0.21 和 0.80,RSGS 的 E-type 估计较 SGS 的 E-type 估计的相对提高指数为 25%。说明 RSGS 较传统的 SGS 有更高的模拟精度,因此后续的土壤全磷的空间格局、土壤磷素流失风险以及不确定性评估均采用 RSGS 的模拟结果。

表 5 SGS 的 E-type 和 RSGS 的 E-type 估计模拟土壤全磷的预测精度对比

Table 5 Comparison of the prediction accuracy of soil total phosphorus using SGS (E-type) and RSGS (E-type) models, respectively

土壤属性 Soil property	方法 Method	平均误差 ME	均方根误差 RMSE	Pearson 相关系数 r	相对提高指数 RI/%
全磷	SGS	0.06	0.28	0.68	
Total phosphorus/(g/kg)	RSGS	0.03	0.21	0.80	25

2.4 土壤全磷的空间分布

采用 RSGS 对金坛区的土壤全磷含量进行空间随机模拟,其产生的第 100(a)、300(b)、500(c)次模拟实现以及 E-type 估计图如图 2 所示。每个模拟实现代表土壤全磷一个可能的空间分布模式,这些模拟实现所对

应的 E-type 估计图代表了最佳估计,且该最佳估计具有一定的平滑效应。由图 2 可知,E-type 预测图在表现区域土壤全磷含量空间变化的总体趋势上较为明显,土壤全磷在研究区的北部、中部以及洮湖周边含量较高,而西部的土壤全磷含量明显低于全区的平均值。虽然各个模拟实现在总体上显示出相似的空间分布模式,但在局部空间变化上却是有差别的,这种局部的变化能够反映出该区域土壤全磷的可能空间分布水平。

本研究中土壤全磷空间分布差异可能是由于区域土壤特性造成的。金坛区的中东部主要为水田,其土壤主要发育于石灰岩,土壤质地较粘,保肥能力较强,因此其土壤磷素含量普遍较高。西部林地的土壤主要发育于石英砂岩、页岩、角砾岩、玄武岩等母岩,多数为中壤土,且西部林地受到的人为干扰较少,其土壤全磷主要来源于母质,因此其土壤磷素含量较低。而对于西部的旱地区,经调查发现其肥料投入较水田多,但该地区土壤淋洗作用较强,所以其土壤全磷的含量较中东部水田低。土壤全磷含量可表征区域土壤磷素的总储量,较高的土壤全磷含量说明影响土壤磷素流失的本底值较高,但难以完全反应本研究区域土壤磷素流失的风险程度。磷肥的施用量、地表径流以及距受纳水体的距离也是重要的影响因子。

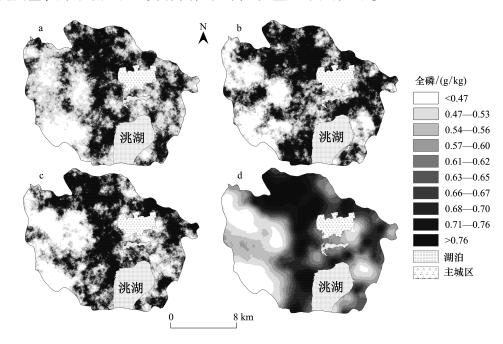


图 2 土壤全磷稳健序贯高斯模拟(RSGS)的第 100(a)、300(b)、500(c)次以及 E-type(d)图

Fig. 2 The 100th realization (a), 300th realization (b), 500th realization (c) and E-type estimate (d) of soil TP generated by RSGS

2.5 土壤磷素流失风险指数空间分布与综合风险评估

金坛区土壤磷素流失风险指数的空间分布模式如图 3 所示,土壤磷素流失风险较高的区域主要集中分布在洮湖周边、金坛主城区的东部及北部,而金坛区西部的 RPI 值较低。图 3d 与土壤全磷 RSGS 模拟生成的 Etype 图(图 2d)对比可知,结合环境因子评估的土壤磷素流失高风险区与土壤全磷的高值区在空间分布上具有一定的相似性,在洮湖的周边,土壤全磷的含量较高,且离受纳水体距离较近,故 RPI 值较大,该区域土壤磷素必然存在较高的流失风险。同时,结合环境因子的评估结果与土壤全磷的分布又存在明显的空间差异,研究区中西部的旱地区,土壤全磷的含量较低,但该区有较大河流,同时地表径流系数较水田高,故该区域表现出较高的土壤磷素流失风险。自然间断点分级法将 RPI 值划分为四个等级,区间为 0.47—0.76、0.77—0.92、0.93—1.05、1.06—1.46 分别对应低、较低、较高、高四个风险等级(表 6)。土壤磷素流失风险性"高"的区域即为金坛区土壤磷素流失的关键源区。由表 6 可知,金坛区土壤磷素流失较高风险区的面积占金坛区总面积的 40.94%,而高风险区的面积占 24.94%,RPI 值在 0.93—1.46(即较高和高风险区)的面积占金坛区总面积 65.88%,而低及较低风险区的面积占比仅为 34.12%,由此可见整个研究区内土壤磷素潜在流失风险较大。

金坛区土壤磷素流失风险等级见图 4。研究区内的土壤磷素流失高风险区主要沿着河流呈现条带状及

斑块状的分布特征,主要分布在研究区的北部及中东部。西部林地的流失风险较低,但西部的旱地由于磷肥投入量、地表径流潜力较大,因此该区域土壤磷素也存在较高的潜在流失风险,但主要分布在河流周边,初步分析金坛区的土壤磷素流失风险分布格局,主要是由土壤全磷、磷肥施用量、距离因子以及地表径流潜力共同作用的结果。

本研究提供的方法仅仅模拟土壤磷素流失的风险指数,而土壤磷素的实际流失往往是一个复杂的自然生态过程。现有的研究表明,林地的土壤磷素流失量较低,耕地土壤磷素流失量较高^[48]。这主要是因为林地土壤磷素的外源输入远远小于耕地,且林地较好的植被覆盖能够有效截留径流中的磷素,在本研究的模拟结果中,金坛区西部林地的土壤磷素流失风险指数远远低于中东部的耕地。孙金华等^[49]利用 AnnAGNPS 模型模拟太湖流域雪堰镇平原水网圩区的土壤磷素流失发现,土壤磷素的流失主要集中在河道两侧,这与本研究的模拟结果一致。而降雨作为土壤磷素的迁移动力,也显著影响着土壤磷素的流失。而本研究针对降雨对土壤磷素流失的影响存在一定的局限性,即没有考虑由降雨的季节性差异而导致的土壤磷素流失风险在时间尺度上的差异性。传统的 PI 法用于评估区域土壤磷素流失风险已经不断得到应用和改进,本研究从土壤全磷空间模拟及风险的不确定角度出发,鉴于区域土壤数据集一般含有一定数量的离群值,这些往往会对传统地统计学模型预测精度产生一定影响,故本研究采用最优稳健不确定性模拟方法,降低空间离群值对模拟结果的影响,且能产生多个可能的空间模拟实现,这样的结果输入到 RPI 模型中,便可快速评估具有类似生态特征的土壤磷素流失风险及其不确定性。

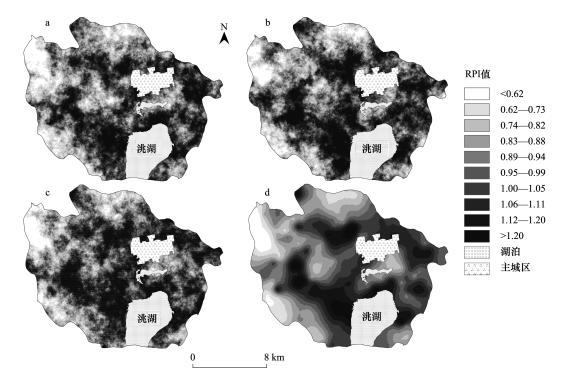


图 3 土壤磷素流失风险快速指数值(RPI)的第 100(a)、300(b)、500(c)次模拟实现以及 E-type 图(d) Fig.3 Map of the 100th realization (a), 300th realization (b), 500th realization (c) and E-type estimate (d) of RPI

表 6 金坛区快速磷指数值(RPI)的等级划分与面积占比

Table 6 Classification and area ratio of RPI in Jintan District

			•	
土壤磷素流失风险指数值 RPI	0.47—0.76	0.77—0.92	0.93—1.05	1.06—1.46
风险等级 Risk grade	低	较低	较高	市同
面积占比 Area ratio	8.04%	26.08%	40.94%	24.94%

2.6 土壤磷素流失风险的不确定性评估

金坛区土壤磷素流失风险指数超过给定阈值的概率分布如图 5 所示。RPI 相对较高(P>0.5)的区域主要集中在中、东部以及西部沿河流周边区域。金坛区土壤磷素流失风险指数的不确定性评价结果显示,当阈值概率划定为 0.50、0.75、0.85、0.95 时,超阈值概率的区域面积分别占金坛区总面积的 16.71%、5.74%、2.84%、1.04%(图 6)。可以看出随着阈值概率的增加,所划定的区域面积不断减小。当阈值概率为 0.85 时(图 6c),研究区中主城区的西北部、洮湖的周边以及西部旱地部分地区土壤磷素流失风险等级高具有很大的可能性。对于那些概率值接近 50%的区域(图 6a),其评价结果就有很大的不确定性。所以这样的概率分布能够给管理部门的决策提供更多空间信息,而不是直接按某个阈值将整个地区机械地划分为不同等级的污染区域^[50]。阈值概率设定为 0.85 时,图 6c 中的划定的区域就要重点实施管控措施。

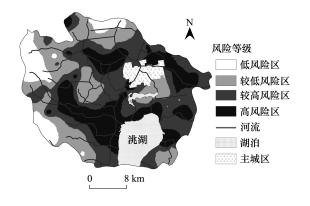


图 4 金坛区土壤磷素流失风险等级图

Fig.4 Level of soil phosphorus loss risk in Jintan District

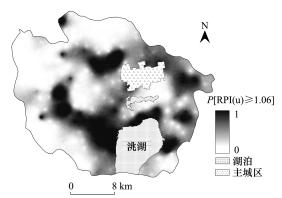


图 5 金坛区土壤磷素流失风险指数(RPI)超给定阈值(1.06)的 概率分布图

Fig.5 Probability map of RPI exceeding the threshold ($RPI \ge 1.06$) in Jintan District

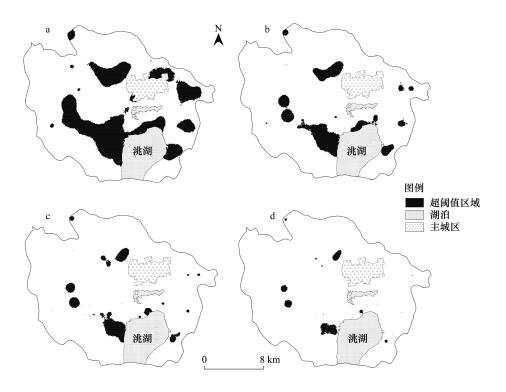


图 6 分别按 0.50、0.75、0.85、0.95 的临界概率划定的土壤磷素流失高风险区域

Fig.6 The highest risk areas of soil phosphorus loss were defined according to the critical probability of 0.50(a), 0.75(b), 0.85(c) and 0.95(d), respectively

3 结论

本研究结合长三角水网发达、多为平原、县域景观异质性小、农田水利工程完善等县域特征,在传统分析土壤磷素空间分布格局的基础上,引入磷肥施用量、距受纳水体距离、地表径流潜力构建了针对长三角典型县域土壤磷素流失风险的 RPI 评估模型;同时,我们将金坛区土壤全磷可能的 RSGS 实现输入该模型,进而评估了流失风险指数可能的空间分布格局;最后我们依据不同的超标概率阈值划定了金坛土壤磷素流失风险的关键源区即高风险区。结果显示土壤磷素流失的高风险区主要沿着河流呈现条带状及斑块状分布,集中分布在洮湖周边、金坛主城区的东部及西部,较高及高风险区(快速磷指数值大于 0.93)的面积占金坛区面积的65.88%。概率阈值分别设定为 0.50、0.75、0.85、0.95 时,其超标面积占金坛区总面积分别达到 16.71%、5.74%、2.84%、1.04%。本研究提供的土壤磷素流失风险信息,有助于决策者从"不确定性"角度为区域土壤磷素的调控,划定更符合实际限制条件的管控区域。

参考文献 (References):

- [1] Campbell J M, Jordan P, Arnscheidt J. Using high-resolution phosphorus data to investigate mitigation measures in headwater river catchments. Hydrology and Earth System Science, 2015, 9(1): 453-464.
- [2] Smith V H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: A global problem. Environmental Science and Pollution Research, 2003, 10(2): 126-139.
- [3] Rodríguez-Blanco M L, Taboada-Castro M M, Taboada-Castro M T. Phosphorus transport into a stream draining from a mixed land use catchment in Galicia (NW Spain); Significance of runoff events. Journal of Hydrology, 2013, 481; 12-21.
- [4] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化.土壤,2000,(4):188-193.
- [5] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91.
- [6] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 农业区非点源污染潜在危险性评价——以于桥水库流域磷流失为例. 第四纪研究, 2003, 23(3): 262-269.
- [7] Gburek W J, Sharpley A N. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 267-277.
- [8] Endreny T A, Wood E F. Watershed weighting of export coefficients to map critical phosphorous loading areas. American Water Resources Association, 2003, 39(1); 165-181.
- [9] 颜晓, 王德建, 张刚, 冉景, 郑继成. 长期施磷的产量效应及其环境风险评价. 环境科学, 2013, 34(8): 3205-3210.
- [10] 路鹏,彭佩钦,宋变兰,唐国勇,邹焱,黄道友,肖和艾,吴金水,苏以荣. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析. 中国农业科学,2005,38(6):1204-1212.
- [11] 焦平金,许迪,朱建强,于颖多. 排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征. 环境科学, 2016, 37(10): 3842-3849.
- [12] Shen Z, Hong Q, Chu Z, Gong Y W. A framework for priority non-point source area identification and load estimation integrated with APPI and PLOAD model in Fujiang Watershed, China. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 977-989.
- [13] 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢.合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析.环境科学,2016,37(1):148-155.
- [14] Reid K D. A modified Ontario P index as a tool for on-farm phosphorus management. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(3): 455-466.
- [15] 刘付程, 史学正, 潘贤章, 于东升. 太湖流域典型地区土壤磷素含量的空间变异特征. 地理科学, 2003, 23(1): 77-81.
- [16] 周慧平,高超,朱晓东. 关键源区识别:农业非点源污染控制方法. 生态学报, 2005, 25(12): 3368-3374.
- [17] Goovaerts P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford University Press, 1997: 483.
- [18] 张世文,王朋朋,叶回春,黄元仿,穆恩林,王来斌,陈孝杨,许光泉.基于数字土壤系统的县域土壤磷素流失风险简化评估.农业工程学报,2012,28(11):110-117.
- [19] Sharpley A, Beegle D, Bolster C, Good L, Joern B, Ketterings Q, Lory J, Mikkelsen R, Osmond D, Vadas P. Phosphorus indices: why we need to take stock of how we are doing. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(6): 1711-1719.
- [20] Lemunyon J L, Gilbert R G. The concept and need for a phosphorus assessment tool. Journal of Production Agriculture, 1993, 6(4): 483-496.
- [21] 杜娟, 李怀恩, 李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西沣河流域非点源负荷来源探讨. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 827-837.
- [22] 廖义善, 卓慕宁, 李定强, 谢真越, 郭太龙. 基于"径流-地类"参数的非点源氮磷负荷估算方法. 环境科学学报, 2014, 34(8): 2126-2132.

- [23] 史小春, 敖天其, 黎小东, 王文章, 杨雯. 涪江流域(射洪境内)面源污染综合评价. 水土保持研究, 2018, 25(4): 375-385.
- [24] 马放, 姜晓峰, 王立, 李光明, 李哲. 基于 SWAT 模型的阿什河流域非点源污染控制措施. 中国环境科学, 2016, 36(2): 610-618.
- [25] 罗倩, 任理, 彭文启. 辽宁太子河流域非点源氮磷负荷模拟分析. 中国环境科学, 2014, 34(1): 178-186.
- [26] 陈丹, 张冰, 曾逸凡, 张海平. 基于 SWAT 模型的青山湖流域氮污染时空分布特征研究. 中国环境科学, 2015, 35(4): 1216-1222.
- [27] 李文超,刘申,雷秋良,翟丽梅,王洪媛,罗春燕,刘宏斌,任天志.高原农业流域磷流失风险评价及关键源区识别—以凤羽河流域为例.农业环境科学学报,2014,33(8):1591-1600.
- [28] 张平,高阳昕,刘云慧,段美春,宇振荣.基于氮磷指数的小流域氮磷流失风险评价.生态环境学报,2011,20(6-7):1018-1025.
- [29] 姚军. 紫色土坡耕地不同施肥水平下氮磷流失特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [30] 史培军,袁艺,陈晋.深圳市土地利用变化对流域径流的影响. 生态学报, 2001, 21(7): 1041-1049.
- [31] 郑庆伟. 农业部: 江苏部分土地减"肥"亟须推进. 农药市场信息, 2015(10): 13.
- [32] 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: 56.
- [33] 周慧平, 高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别. 环境科学, 2008, 29(10): 2696-2702.
- [34] 程炯, 邓南荣, 蔡雪娇, 刘平, 刘晓南. 不同源类型农业非点源负荷特征研究—以新田小流域为例. 生态环境, 2008, 17(6): 2159-2162.
- [35] Matheron G. Principles of geostatistics. Economic Geology, 1963, 58: 1246-1266.
- [36] Cressie N, Hawkins D M. Robust estimation of the variogram. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1980, 12(2): 115-125.
- [37] Dowd P A. The variogram and Kriging: Robust and Resistant Estimators.//Verly G, David M, Journel A G, Marechal A eds. Geostatistics for Nutral Resources Characterization, Part 1. Norwell: D. Reidel, 1984: 91-106.
- [38] Genton M G. Highly Robust Variogram Estimation. Mathematical Geology, 1998, 30(2): 213-221.
- [39] Lark R M. Comparison of some robust estimators of the variogram for use in soil survey. European Journal of Soil Science, 2010, 51(1): 137-157.
- [40] Rawlins B G, Lark R M, O'Donnell K E, Tye A M, Lister T R. The assessment of point and diffuse metal pollution of soils from an urban geochemical survey of Sheffield, England. Soil Use and Management, 2005, 21(4): 353-362.
- [41] Remy N, Boucher A, Wu J. Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide. NewYork: Cambridge University Press, 2009: 353-356.
- [42] Qu M K, Li W D, Zhang C R. Assessing the risk costs in delineating soil nickel contamination using sequential Gaussian simulation and transfer functions. Ecological Informatics, 2013, 13; 99-105.
- [43] Zhang R, Warrick A W, Myers D E. Improvement of the prediction of soil particle size fractions using spectral properties. Geoderma, 1992, 52(3-4): 223-234.
- [44] 李亦秋, 鲁春霞, 邓欧, 刘艺. 流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区. 生态学报, 2014, 34(11): 3081-3089.
- [45] 王绍强,朱松丽,周成虎.中国土壤土层厚度的空间变异性特征. 地理研究, 2001, 20(2): 161-169.
- [46] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612.
- [47] Cambardella C, Moorman T, Parkin T, Novak J, Karlen D L, Turco R F. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [48] 柳冬青,张金茜,李红瑛等.基于地理探测器的流域土壤磷流失影响因素分析.环境科学学报,2018,38(12):4814-4822.
- [49] 孙金华,朱乾德,练湘津,秦飞,陈成.平原水网圩区非点源污染模拟分析及最佳管理措施研究.长江流域资源与环境,2013,22(Z1):75-82.
- [50] 史舟, 李艳, 程街亮. 水稻土重金属空间分布的随机模拟和不确定评价. 环境科学, 2007, 28(1): 209-214.