

基于 GIS 技术的耕地土壤环境质量综合评价研究

——以山西省永济市为例

李 华^{1,2}, 毕如田³, 乔显亮^{1,4}

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 南京 210008; 2 山西大学环境与资源学院, 太原 030006;
3 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; 4 大连理工大学环境与生命学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 以山西省永济市耕地为研究区域, 通过收集整理土壤环境质量样点数据, 运用 GIS 技术建立了土壤环境质量数据库, 依据国家土壤环境质量评价标准进行分析评价, 获得了永济市耕地土壤环境质量评价结果。土壤面源污染水、土综合评价结果表明: 18 个样点中有 3 个为无污染, 11 个为轻度污染, 4 个为中度污染。点源污染土壤综合评价结果表明: 该区主要污染物为 F、Cl、Pb、Cd、As 及 DDT。蔬菜地样点综合评价表明: 大部分蔬菜生产符合绿色食品种植要求 (NY/T391-2000) 和无公害食品蔬菜地种植要求 (NY5010-2001); 在不符合要求的样点中, 超标物主要是 Cd、Pb、Hg、As 及 DDT。该研究为进一步加强土壤环境质量管理与修复决策奠定了基础。

关键词: 土壤环境质量; 空间数据库; GIS 技术; 综合评价

中图分类号: X825; S126

随着人民生活水平的提高, 对粮食、蔬菜、水果等农产品的质量安全提出了更高要求, 其中土壤污染、化肥污染和农药污染是重要的根源, 特别是我国加入 WTO 后, 我国农产品要参与国际竞争, 因此研究耕地土壤环境状况、污染分布与程度, 并提出防治对策与修复方法具有十分重要的意义。

土壤环境信息与地理空间位置密切相关^[1-3], 具有典型的数量与时空关系, 土壤环境空间数据是土壤环境信息的数量化和图形化表示, 而作为一种反映生态环境系统中人类的施力、系统的状态、人类的反馈与系统表现出来的环境效应之间的时空关系及其数量比例、特征性质的地球空间数据, 土壤环境空间数据具有一系列独特的特征, 突出表现为: 空间参考性和空间拓扑特征; 时序性特征; 分布式特征; 多维性和多尺度特征。土壤环境信息是开展评价、预测、规划与决策的依据,

山西省永济市为国家优质棉生产基地、山西省商品粮生产基地, 农、林、牧、渔业生产优势明显。本研究通过对永济市耕地的重金属含量、水环境状况、化肥农药施用情况等资料的整理, 运用 GIS 技术建立了土壤样点属性和空间数据库; 通过分析评价, 得到永济市土壤环境质量状况, 并建立评价结果空间数据

库, 可为制定无公害农产品生产管理与规划提供科学的依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

永济市位于黄河中游, 山西省南部, 运城盆地西南端。地跨东经 $110^{\circ}14' \sim 110^{\circ}45'$, 北纬 $34^{\circ}40' \sim 35^{\circ}04'$, 属暖温带大陆性季风气候, 年均温为 13.5°C , 年均降水量为 504.7 mm (集中在 6—9 月份, 占全年降雨量的 60%)。本区域海拔高差较大, 土壤的形成和分布因受垂直性、地带性和地域性的生物气候和地理环境作用, 造成土壤类型多样化, 包括有棕壤、褐土、草甸土和沼泽土。在各类土壤中, 优质土壤比重大, 适种性广。该区土地总面积 12.2 万 hm^2 , 其中耕地 5.26 万 hm^2 , 以小麦、棉花等农作物为主。

1.2 研究方法

1.2.1 基础数据获得 研究数据由采样点数据与基础图件资料两部分组成。为了反映出土壤环境空间信息, 利用 GIS 进行数据处理与空间分析, 克服了分析方法的不足, 实现环境信息分析的空间与属性一体化分析与综合处理的功能, 需要运用基本图件资料建立永济市耕地资源空间数据库, 图件资料包括: 土地

基金项目: 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目 (055110) 和山西省自然科学基金项目 (20051034) 资助。

作者简介: 李华 (1971—), 女, 北京市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤与环境污染治理研究。E-mail: lihua@sxu.edu.cn

利用现状图、地形图、行政区划图、土壤图、基本农田保护块现状图、水利分区图、地貌类型分区图、采样点位图等，统一比例尺为1:50000。

(1) 样品采集：污染调查点重点设在怀疑或已证实有污染的地方，包括污水或污水灌溉的农田，工矿企业和城镇周围农田，大量堆放工业废渣、城市垃圾的地点周围的农田，大量应用农药、化肥、农用塑料的农田等。农田面源污染样点密度及位置是在实地调查基础上进行确定，共计18个土壤点位，8个大田灌溉水样；点源污染主要依据市化肥厂、发电厂、电机厂、印染厂、纺织厂、化工厂、涑水河等7个重点污染源的分布情况，距源中心250m、500m、1000m分别布点，共确定了21个样点。蔬菜地共取100个土壤点位，其中，常规菜区26个、辣椒产区19个、芦笋产区31个、瓜菜产区4个、日光温室20个。

(2) 样品的化学分析^[4-5]：土壤经过4:1(体积比)HCl和HNO₃消化。采用石墨炉原子吸收分光光度法测定土壤中Pb、Cd含量；原子吸收分光光度法测定水体中Pb、Cd含量；火焰原子吸收光谱法测定土壤及水体中Cr含量；冷原子吸收光谱法测定土壤及水体中Hg含量；二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法测定土壤及水体中As含量。土壤及水体中pH值用电极法在1:2.5土水比条件下测定。土壤中六六六、DDT含量采用气相色谱法测定。水体中NO₃⁻-N含量采用酚二磺酸分光光度法测定；化学需氧量(COD)采用重铬酸盐法测定；重量法测定悬浮物；亚甲基蓝分光光度法测定硫化物。

1.2.2 数据库建立 数据库的建立包括空间数据库与属性数据库两大部分。空间数据库的建立以MapGis系统为工具，空间数据的输入采用对图件扫描后进行矢量化的方式进行，底图比例尺均为1:50000。属性数据库的数据来源于采样点数据、有关调查统计资料以及室内分析数据等。属性数据库的建立采用Visual Foxpro数据库管理系统进行。

对每一个图形分层采集后，应该为相应的图层赋予对应的属性数据。在MapGis系统对图件矢量化过程中，通过标记多边形标识点，建立多边形编码表，而在FoxPro系统中，采用同样的编码表建立属性数据库，这样就可以通过MapGis与FoxPro公共编码表实现空间数据与属性数据的统一管理^[3]。

1.2.3 综合评价模块应用 MapGis是一种基于Windows平台的工具型地理信息系统软件，它能够方便地进行图形、图像、属性等数据的输入、整饰、校准和维护，具有直观实用的属性动态定义编辑功能和多媒体数据、外挂数据的管理能力。它提供了较全的矢量空间分析、DTM分析、网络分析以及拓扑空间分析和三维实体叠加分析能力。

虽然MapGis系统本身具有较完善的数据管理与分析功能，但对于土壤环境质量评价数据库的应用还需要以MapGis为平台进行二次开发。土壤环境质量综合评价模块，采用Visual C++设计，用户界面使用Visual C++语言设计基于Windows的图形界面，主要功能模块将由此界面提供菜单驱动来完成。综合评价应用模型处理流程如图1所示。

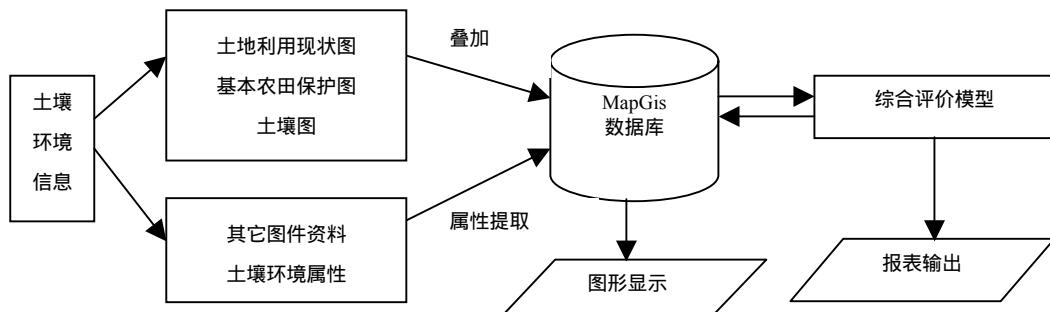


图1 土壤环境质量综合评价应用模型流程

Fig. 1 Flowchart of the model for comprehensive appraisement of soil environmental quantity

在建立土壤环境数据库过程中，要注意时间属性的建立，由于污染源的治理、作物吸收等因素，土壤污染物含量随着时间推移而发生变化，因此时间属性

的建立可实现土壤环境质量动态分析与评价。此外，对于面源污染中非样点土壤的环境质量评价，则在满足一定调查精度的情况下，采用Kriging空间插值的方

法来获取评价单元的数据。点源污染的环境质量评价则直接对采样点数据进行分析。

1.2.4 土壤环境质量评价 (1) 土壤环境质量标准：对土壤的利用目的不同，会引用不同的标准^[6]。我国于1995年首次颁布了《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)，在全国范围内统一了环境质量评价标准。近年来，有关行业还颁布了与土壤环境质量相关的质量标准，如《绿色食品产地环境技术条件》(NY/T391-2000)提出了土壤中各项污染物限值，又如农业部颁布的《无公害食品蔬菜产地环境条件》(NY5010-2001)等。农田灌溉水的水质标准采用1992年修订的《农田灌溉水质标准》(GB5084-1992)。系统可根据采样点的资料情况选择相应的评价标准。

(2) 土壤污染评价方法：由于不同环境要素的各项指标对人体及生物的危害影响不同，如土壤中Cd的生物学危害要大于Cu。因而，把水、土等各个环境要素的评价指标分为两类，一类为严控指标，另一类为一般控制指标。永济市土壤与灌溉水评价指标分类如表1所示。表1中的严控指标中只要有一项超标即视为该级别不合格，应相应降级。一般控制指标若有一项

或多项超标，只要当该环境要素的综合污染指数 <1 时，可不降级。

污染指数的计算应根据严格控制指标和一般控制指标(表1)相结合的综合评价方法，分3步进行^[5]：

严格控制指标评价。采用单项污染指数法，即计算 $P_i = C_i/S_i$ ，其中， P_i 表示污染物*i*的污染指数， C_i 表示污染物*i*的实测值， S_i 表示污染物*i*的评价标准。若 $P_i > 1$ ，即严格控制指标超标，则判定为不合格，不再进行一般控制指标评价， P_i 值越大，污染越严重；若 $P_i < 1$ ，严格控制指标未超标，继续进行一般控制指标评价。一般控制指标评价。采用单项污染指数法，仍然计算 P_i 值，若 $P_i < 1$ ，一般控制指标未超标，判定为合格，不再进行综合污染指数法评价；若 $P_i > 1$ ，一般控制指标有超标，则需进行综合污染指数法评价。

综合污染指数法评价。在没有严格控制指标超标，而只有一般控制指标超标的情况下，采用单项污染指数平均值和单项污染指数最大值相结合的综合污染指数法，即采用内梅罗型综合污染指数方法计算出综合污染指数并进行评价^[7]，当综合污染指数超过1.0时进行降级处理。

土壤面源污染、点源污染、大田灌溉水质评价部分结果如表2~4所示，表中评价值为内梅罗型综合污染指数，等级I表示所有单项指标均未超标，等级II表示未达到等级I标准后的降级，等级III、IV依此类推。

表1 评价指标分类
Table 1 Grades of appraisement index

环境要素	严控指标	一般控制指标
土壤	Cd, Hg, As, Cr	Pb, 六六六, DDT
灌溉水	Pb, Cd, Hg, As, Cr	pH, CODcr, F, Cu

表2 土壤面源污染综合评价部分结果表
Table 2 Evaluation of soils under non-point source pollution

样点号	Cd	Hg	As	Cr	Pb	六六六	DDT	评价值	等级
1	0.670	0.05	0.438	0.274	0.147	0.22	0.24	0.67	I
2	0.977	0.05	0.438	0.303	0.257	0.08	0.00	0.98	I
3	1.008	0.00	0.463	0.274	0.129	0.30	0.00	1.01	II
18	0.825	0.00	1.217	0.298	0.159	0.86	1.70	1.70	III

表3 土壤点源污染综合评价部分结果表
Table 3 Evaluation of soils under point source pollution

样点号	Cd	Hg	As	Cr	Pb	六六六	DDT	评价值	等级
1	0.342	0.55	0.596	0.378	0.131	0.38	0.54	0.60	I
2	0.292	2.70	0.669	0.326	0.127	0.40	0.58	2.70	II
3	0.208	0.10	0.515	0.272	0.075	0.40	1.00	1.00	II
21	1.280	0.10	0.365	0.278	0.183	0.38	0.86	1.28	II

表4 大田灌溉水质综合评价部分结果表

Table 4 Evaluation of irrigation water quality

样点号	Pb	Cr	Hg	As	Cd	pH	COD	氟化物	Cu	Zn	总P	评价值	等级
1	0.00	0.8	0.0	0.70	0.13	0.533	0.354	0.083	0.000	0.019	0.022	1.37	II
2	0.00	0.6	0.2	2.24	0.56	0.933	0.021	1.250	0.011	0.226	0.015	3.23	IV
3	2.20	0.6	0.2	3.08	0.15	0.400	0.165	0.457	0.048	0.017	0.221	3.26	IV
8	0.00	0.2	0.0	0.46	0.33	0.933	0.021	1.318	0.000	0.019	0.033	1.32	II

(3) 土壤和水环境质量综合评价：在对土壤和水作综合评价时，首先分别计算出土壤和水的综合评价指数 P_{\pm} 和 $P_{\text{水}}$ ，若两者为不同级别，则选择水质和土壤二者环境要素中低级别为基础。如某代表样点土壤为1级、水为2级，则进行土壤和水质环境质量综合评价时以2级为基础，并在该级标准下计算水、土的综合指数。综合评价中根据专家意见，土壤和水的权值分别为0.65和0.35，即按照如下公式计算土壤和水

环境质量综合评价指数 $P_{\text{综合}}$ ：

$$P_{\text{综合}} = 0.65 \times P_{\pm} + 0.35 \times P_{\text{水}}$$

对各类型蔬菜地100个样点进行综合评价，各样点评价结果统计如表5所示，其中A级是按照绿色食品种植要求(NY/T391-2000)进行评价达标的样点，B级是按照无公害食品蔬菜地种植要求(NY5010-2001)进行评价达标的样点，C级为不符合以上两种评价要求的样点。

表5 各类型蔬菜地样点评价统计表

Table 5 Evaluation statistics of vegetable soils at different sampling sites

类型	总面积 (hm ²)	取样数 (个)	A级		B级		C级	
			样点数(个)	百分比(%)	样点数(个)	百分比(%)	样点数(个)	百分比(%)
常规菜区	433	26	17	65.4	7	26.9	2	7.7
辣椒产区	533	19	13	68.4	5	26.3	1	5.3
芦笋产区	6000	31	26	83.9	3	9.7	2	6.4
瓜菜产区	100	4	1	25.0	3	75.0	0	0
日光温室	67	20	15	75.0	5	25.0	0	0

2 结果与讨论

采样点的综合评价表明，大田环境的主要污染元素为F、Cl、Pb、As、Cd及DDT，主要污染区域为于乡镇百户、栲栳镇长杆、蒲州镇韩家庄、西厢、南文学、开张镇常营、民生、普乐头、韩阳镇长旺、城北办赵伊、城东办吴村等村庄的部分耕地。

土壤面源污染综合评价中，在所取的18个点样中，15个样点大田污染指数值1；在大田中所取的8个灌溉水样中，除西厢村的井水为无污染外，其余井水均受到不同程度的污染。水、土综合评价结果表明，18个样点中有3个为无污染，11个为轻度污染，4个为中度污染。

从点源污染土壤综合评价结果可以看出，7个点源污染源21个采样点的土壤和水综合评价结果：纺织厂、化肥厂附近农田为非污染；电机厂、印染厂、五七五厂附近的城西办庄子、小张、城北办赵伊、城东办吴村的部分农田为轻度污染；延涑水河流域的开张

镇城子村、民生、普乐头等地的农田为中度污染。化工厂附近的于乡镇百户村的部分农田为重度污染。主要污染物为F、Cl、Pb、Cd、As及DDT。

各类型蔬菜地样点综合评价表明，该区大部分蔬菜生产符合绿色食品种植要求(NY/T391-2000)和无公害食品蔬菜地种植要求(NY5010-2001)，在不符合要求的样点中，常规蔬菜区超标物主要是Cd、DDT、As、Pb，辣椒产区超标物主要是Hg、DDT，芦笋产区超标物主要是Cd，瓜菜产区超标物主要是Cd、Pb，日光温室区超标物主要是Pb。

运用GIS技术，可将全部原始资料以及各类因子评价结果和综合评价结果存储在空间数据库中，在土壤环境属性数据和空间数据库间，通过建立公共字段进行关联，使得对样点的属性和空间数据实现了既是分开存储，又可联合查询和管理，可方便地查询相关数据，并生成土壤环境质量评价结果空间数据库，各类数据均以表格和图形方式进行表示，直观简明地

反映出污染物的空间结构。将土壤和水环境质量综合评价结果用图形的方式表示，图2和图3为大田面源

污染综合评价结果以及各污染样点评价结果，可通过直观的方式对各类样点进行查询、评价和管理。

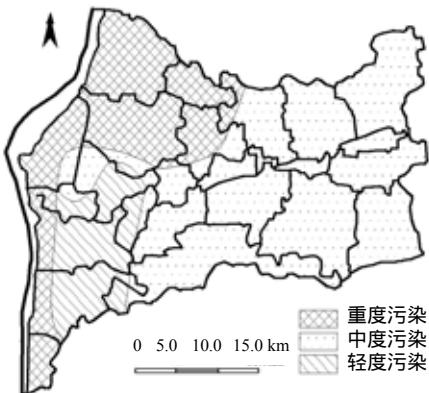


图2 面源污染评价图

Fig. 2 Appraisal map of non-point source pollution

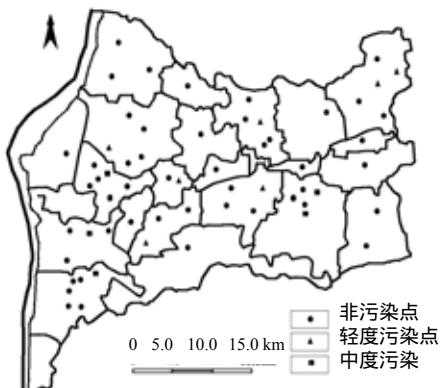


图3 污染样点分布图

Fig. 3 Distribution map of polluted sampling sites

目前我国土壤和农作物中有毒物质的残留问题日趋突出^[8]，一方面要尽快开展全国土壤环境质量调查与评价，建立长期性的土壤环境质量监测网络，另一方面还要重视土壤环境信息系统的建设，提高信息的利用效率。由于土壤环境是一个动态系统，应通过在空间数据库中设置时间属性，以便能对不同时间段的评价结果进行比较，使GIS系统不仅仅支持空间数据，而且能反映出空间动态信息^[9-10]。基于时空数据模型的GIS系统及其在土壤环境管理中的应用是值得进一步研究的课题。

3 结论

运用GIS的空间分析和空间数据管理功能，建立了永济市土壤环境质量数据库，并依据国家土壤环境质量评价标准进行了土壤环境质量评价，获得了永济市耕地土壤环境质量评价结果。土壤面源污染水、土综合评价结果表明，18个样点中有3个为无污染，11个为轻度污染，4个为中度污染。点源污染土壤综合评价结果表明，该区主要污染物为F、Cl、Pb、Cd、As及DDT。蔬菜地样点综合评价表明，大部分蔬菜生产符合绿色食品种植要求(NY/T391-2000)和无公害食品蔬菜地种植要求(NY5010-2001)，在不符合要求的样点中，超标物主要是Cd、Pb、Hg、As及DDT。

参考文献：

- [1] 周勇, 张海涛, Birnin RV, 汪善勤, 任意. 土壤资源与生态环境数据库的建立及应用. 土壤学报, 2002, 39 (5): 653-663
- [2] Hu XF, Wu HX, Hu X, Fang SQ, Wu CJ. Impact of urbanization on Shanghai's soil environmental quality. Pedosphere, 2004, 14 (2): 151-158
- [3] 毕如田, 王镔, 段永红, 李华, 王晋民. 耕地资源管理信息系统的建立及应用—以永济市为例. 土壤学报, 2004, 41(6), 962-968
- [4] 鲁如坤. 土壤农业化学分析. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [5] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [6] 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法. 土壤, 2001, 33 (6): 298-302
- [7] 吴国旭. 环境评价. 北京: 化学工业出版社, 2002: 78
- [8] 董元华, 张桃林. 基于农产品质量安全的土壤资源管理与可持续利用. 土壤, 2003, 35 (3): 182-186
- [9] 翟亮, 李霖. 基于时空数据模型的土地信息系统. 测绘科学, 2004, 29 (3): 45-48
- [10] 刘仁义, 刘南. 动态土地信息系统时空过程及时空数据存储. 中国图象图形学报, 2002, 7 (4): 388-393

GIS-Based Comprehensive Appraisement of Soil Environmental Quality

——A Case Study of Yongji City, Shanxi Province

LI Hua^{1,2}, BI Ru-tian³, QIAO Xian-liang^{1,4}

(1 *Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *Environmental Resource College of Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3 Resource Environmental College of Shanxi*

Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 4 Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Based on the soil environmental quality data collected through sampling and the soil environmental quality database established with the aid of GIS, the farmlands of Yongji City, Shanxi Province, were appraised by referring to the national criteria for evaluation of soil environmental quality. Results showed that among 18 sampling sites, 3 sites were not polluted yet, 11 slightly polluted, and 4 moderately polluted, and that main pollutants in the region were F, Cl, Pb, Cd, As and DDT. Most of the vegetable fields met the criteria of NY/T391-2000 for production of green food and NY5010-2001 for production of hazard-free food and Cd, Pb, Hg, As and DDT were main pollutants in the sampling sites that fell short of the standard. The findings of the research has laid down a foundation for further strengthening soil environmental quality management and decision-making for remediation.

Key words: Soil environmental quality, Spatial database, GIS technology, Comprehensive appraisal