

中国农田重金属污染预警系统研究

侯彦林

(农业部环境保护科研监测所,天津 300191)

摘要:本文分析了农田重金属污染的“物质-驱动力-环境因素”的相互关系,结合中国国情,初步建立了中国农田重金属污染预警系统。它包括:农田重金属污染预警的“天-地-人通用概念模型”;国家级、省级综合预警和县级单一预警方法;粮食季单产、耕地人口密度、耕地工业产值三个预警指标;“红橙黄绿青蓝紫”7个警级;省级预警中的工业和经济开发区等标记方法,县级预警中的城郊区、矿山区、污灌区、交通线、污染水体、养殖基地等标记方法;国家级、省级预警实例。研究结果表明:系统适合中国国情;预警方法科学、通用、实用、简单;预警指标符合中国国情和实际,所需数据容易获得。

关键词:预警;农田重金属污染;系统;中国

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0697-09

The Warning System of Heavy Metal Pollution in the Farmland of China

HOU Yan-lin

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: The relationship of "material-driving force-environmental factors" in farmland heavy metal pollution was analyzed and warning system of heavy metal pollution in the farmland of China was initial established combined with the situation of China. It contains: "heaven, earth and human universal conception model" of farmland heavy metal pollution warning; comprehensive warning method of national level, province level and single warning method of county level; grain yield per unit, farmland population density, farmland industrial output warning indexes; "all colors of the rainbow" 7 warning levels; labeling method for industry and economic development zone et al. in province warning and suburb, mining area, sewage irrigation area, traffic road, polluted water body and breeding base et al. in county warning; warning examples in national level and province level. Results showed that: the system is suitable for Chinese situation; the method of warning is scientific, universal, practical and simple; the index of warning meets the Chinese situation and practice, desired data is easy to obtain.

Keywords: warning; farm land heavy metal pollution; system; China

1 中国农田重金属污染预警研究现状

中国农田重金属污染伴随20世纪80年代的工业现代化、农业现代化、城镇化、规模养殖化而开始,并表现为前期为加速阶段,之后为匀速阶段的特征。在研究上,前期研究案例较少、以单一污染和特殊区域(如污灌区)为主,逐渐过渡到研究案例增多、复合

污染、土壤-作物关系为重点的研究阶段,再到如今的国家项目支持、防治结合和区域性为特征的第三阶段,充分反映出我国农田重金属污染严重之趋势^[1-4]。

国外农田重金属污染预警研究工作也是伴随工业化进程而开展的,已形成一些较为成熟的预警方法,但方法研究的居多,也未形成不同行政级别的预警系统^[5-14]。而我国目前农田重金属污染预警研究工作正处于起步阶段,同样缺乏贯穿不同行政级别的系统性、通用性、权威性和信息化的动态预警系统^[15-23],当前多数微观机理和过程研究成果不能支撑系统的预警研究工作,使我国环境预警理论研究尚属空白^[15]。农田重金属污染预警预测是当前农田质量评价面临的难点和热点,由于成土母质、土壤、水、生物、大气之间,农田、城市、水体等生态系统之间,以及自然环境

收稿日期:2011-10-10

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2012ZL006);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业部环境保护科研监测所)资助项目(2011-WN-8)

作者简介:侯彦林(1959—),男,吉林公主岭人,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为生态平衡施肥、粮食产量预测、面源污染预测、数据挖掘和农业信息技术研究。

E-mail: ylhou@263.net。

客体与人类社会主体之间的相互联系、相互影响、相互作用关系的错综复杂以及不确定性,使得农田重金属污染预警预测工作无论在理论上还是在方法技术上都是不成熟的,具有很强的探索性,真正实现预警预测的难度较大^[24-25]。又由于农田重金属污染具有自身规律和国情特点,所以,中国农田重金属污染预警预测必须建立在符合污染规律和自身国情的理论和方法基础之上。农田重金属污染研究在宏观上需要回答两个基本问题,一个是污染现状,一个是污染预警、预测预报,前者是基础,后者是应用,而预警系统必须实现宏观、动态和系统化,高级预警系统必须具有通用性,基层预警系统要具有地方性,这样才能不断地为各级政府提供决策依据。因此,农田重金属污染预警研究具有前瞻性、战略性和创新性特点,必将成为农业环境保护宏观研究的重要内容,兼具微观研究结果数据挖掘和提供宏观决策依据的双重作用。

为建立全国农田重金属污染预警系统,本文对农田重金属污染预警进行如下定义:根据造成农田重金属污染的原因和指标对农田重金属污染可能处于的状态进行分级警示^[15,26]。以若干社会经济指标作为预警指标的土壤重金属预测研究与以上定义相符^[26]。为了更加明确预警、预测、预报三者关系,再对本系列研究拟采用的农田重金属污染预测和预报进行如下定义:预测是建立在不同时段、农田重金属污染数据基础之上的、对未来时段农田重金属的估计^[27-28],预报是针对突发事件对农田重金属短时间影响的推测。基于以上定义,凡是根据GIS技术、数学分析方法和遥感技术等对同一时段农田重金属污染数据进行空间分析、插值计算和预测的研究均不在本系列研究的预警、预测和预报定义范畴内^[29-32]。

2 中国农田重金属污染预警的“天-地-人通用概念模型”

2.1 农田重金属污染的“物质-驱动力-环境因素”的相互关系^[33-34]

人类造成的所有污染最终一定会污染土壤、水体和大气,这三大系统相互作用,污染物质在其中循环,构成整个地球污染物质的链和网。农田重金属污染主要是农业生产使用的肥料和农药所带来的污染、工业排放的三废污染、生活产生的三废污染。现阶段普适性认识是:人是农田重金属污染的最终根源;在农田重金属污染治理见效之前,污染程度只会加剧,污染面积也只会扩大,因为重金属在农田中的行为决定其

很难被消除,即重金属污染具有不可逆性。

在任何一个农田单元上,在任何时间内确定以上三方面来源的重金属数量的工作是极其困难的,许多变量并不是常数,并且这些重金属一旦进入到土壤中,其去向又变得异常复杂。大量研究表明:如果足够的重金属到达土壤,则无论气候和土壤属性如何不同,其结果都将产生污染,即重金属数量是农田重金属污染的物质基础。就我国气候条件而言,南方农田重金属污染普遍高于北方农田,因为南方每年种植季节长,年单产高,肥料和农药用量多;经济发达也是重要因素,致使沿海经济发达地区农田重金属污染普遍高于内地。水系的发达也加速了重金属向更广阔的农田扩散,不断地把点源污染物扩散到农田,因此水是农田重金属扩散的主要驱动力之一。当然,同样数量的重金属进入到不同的地貌单元和不同属性的土壤时,所表现的污染特征是不同的,这说明地貌和土壤环境因素对重金属污染起到加速或延缓的作用,但不能从根本上扭转污染的方向。

2.2 中国农田重金属污染预警的“天-地-人通用概念模型”

农田重金属污染预警需要根据造成重金属污染的原因和指标进行预警,由于空间上任意单元的污染物质、驱动力、环境因素很难确定,为此我们将农田重金属污染的“物质-驱动力-环境因素”的相互关系转化成“天-地-人通用概念模型”,即农田重金属污染主要受“天-地-人”三大类因素影响,这样也可以把对农田重金属的直接预测转化到对农田重金属污染驱动力的划分上,即预警。“天-地-人通用概念模型”如下:

$$Y(\text{农田某重金属含量}) = f(\text{天,地,人})_{s,t} = f(c, l, h)_{s,t} \quad (1)$$

其中,“天”是以气候(Climatic)为主的大环境要素的综合因素;“地”是以土地(Land)为主的下垫面局部环境条件,包括地貌和土壤等;“人”是以人(Human)为主的社会、经济综合影响因素;重金属含量同样也与农田所处的空间位置(Space)和时间(Time)有关。这里,特定的“天”、“地”和“人”组合在一起也构成特定的“空间”,即不同类型的种植区。以农田中任意一点某重金属含量为例,其平衡方程为: W_i (i 时段某重金属含量)+ W_{input} (从 i 时段到 j 时段土壤输入的该重金属的量)= W_j (j 时段该重金属含量)+ W_{output} (从 i 时段到 j 时段土壤输出的该重金属的量),从而得到:

$$W_j = W_i + (W_{\text{input}} - W_{\text{output}}) \quad (2)$$

一般地,式(2)中,只要该重金属污染源还在,则 $(W_{input}-W_{output})>0$,并随时间增加而增加。因此,某类种植区农田重金属点污染(Y)与时间(t)的关系式(3)成立:

$$Y=f(t) \tag{3}$$

式(3)中 Y 为 $W_j, f(t)$ 即为 $(W_j+W_{input}-W_{output})$ 。现对式(1)进行简化:对于任何一个行政单元或一个具体的区域, c, l, s 是相对固定的, 假如使用最近 3~5 a 平均数据作为指标或参数时, t 也是固定的, 于是不同行政单元上由于 h 的不同导致农田重金属污染的人为驱动力不同, 农田重金属污染预警主要是对 h 进行划分。这里, 再将 h 划分为三个主要因素: 肥料和农药产生的污染, 用粮食季单产表示; 生活产生的污染, 用耕地人口密度表示; 工业排放的污染, 用耕地工业产值表示。单产是区域性、持续性的污染驱动力; 人口是具有区域性和局域性双重特征的持续性的污染驱动力; 工业产值是局域性的、波动性的、持续性的污染驱动力。之所以选择以上三个指标, 是因为它们分别代表重金属污染物质的三个来源, 数据容易获得, 研究结果具有相对可比性。上述分析可以概括为:

$$Y=f(t)_{s,t}=f(\text{粮食单产、耕地人口密度、耕地工业产值})_{s,t} \tag{4}$$

以上三个因素的具体指标确定如下: 各级行政单元最近 3~5 a 的粮食平均季单产($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 表示粮食单产所带来的对耕地重金属污染的驱动力; 各级行政单元最近 3~5 a 的人口与耕地面积之比($\text{万人}\cdot\text{hm}^{-2}$)作为耕地人口密度, 表示人口排污对耕地重金属污染的驱动力; 各级行政单元最近 3~5 a 的平均工业产值与耕地面积之比($\text{万元}\cdot\text{hm}^{-2}$), 表示工业产值所带来的

对耕地重金属污染的驱动力。选择以上三个农田重金属污染预警指标时, 考虑了指标的科学性(代表三个重金属污染源)、可比性(三个指标在同一时间段内相对可比)、全局性(使用行政区的平均指标)、统一性(不同行政级别的指标是统一的)、超前性(三个指标可以预测, 使得预警不但是对现状的预警, 也可以对未来情景进行预警)、灵活性(除三个指标外增加了地方性影响因素, 见表 1)、实用性(指标直接和重金属排放数量相关)、可持续性(数据随时可以更新)等^[15]。

现将全国、省、县级农田重金属污染预警指标和结果表示列入表 1。

3 中国农田重金属污染预警系统的建立

3.1 国家级重金属综合污染预警系统

预警单元: 省、自治区、直辖市为基本预警单元, 预警单元数为 31 个。

预警目的: 综合预警, 为国家战略规划制定提供参考依据。

预警指标: 省最近 3~5 a 粮食平均季单产、省最近 3~5 年平均耕地人口密度、省最近 3~5 a 平均耕地工业产值。

预警值计算方法: 以全国某省某指标最高和最低为相对 100%和 0%, 折算所有省的三个相对指标, 其变动范围为 0%~100%; 预警值等于三个相对指标之和再除以 10, 这样预警值变动范围为 0~30 之间(这里假设三个指标对农田重金属污染影响的权重是相等的), 它反映粮食单产、耕地人口密度、耕地工业产值三大指标对农田土壤重金属污染的潜在程度, 并定义 10 为警示线。

表 1 全国、省、县级农田重金属污染预警指标和结果表示

Table1 Warning indexes and results of farmland heavy metal pollution in national, province and county level

项目 Item	全国 National	省 Province	县 County
目的 Goal	综合预警	综合预警	单一预警
单元 Unit	省	县	乡镇
指标 Index	粮食季单产	粮食季单产	粮食季单产
	耕地人口密度	耕地人口密度	耕地人口密度
	耕地工业产值	耕地工业产值	耕地工业产值
		工业和经济开发区、其他	城郊区、矿山区、污灌区、交通线、污染水体、养殖基地、其他
警级 Warning level	P1 红、P2 橙、P3 黄、	C1 红、C2 橙、C3 黄、	T1 红、T2 橙、T3 黄、
	P4 绿、P5 青、P6 蓝、	C4 绿、C5 青、C6 蓝、	T4 绿、T5 青、T6 蓝、
	P7 紫	C7 紫	T7 紫

即,某一预警指标的相对指标(用 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别表示三个指标的相对指标) $=(\text{某省/县/乡镇的某一指标}-\text{全省/县/乡镇该指标的最低值})/(\text{省/县/乡镇该指标的最高值}-\text{省/县/乡镇该指标的最低值})\times 100\%$

(5)

预警值 $Y=(Y_1+Y_2+Y_3)/10$

(6)

预警等级划分方法^[15]:将预警值划分为7个区间,分别命名为“红橙黄绿青蓝紫”7个警示级别。分别命名为P1红、P2橙、P3黄、P4绿、P5青、P6蓝、P7紫,P为省(Province)的英文缩写。即: $0\leq Y<5$,红,警戒线以下; $5\leq Y<10$,橙,警戒线以下; $10\leq Y<14$,黄,轻度污染警示; $14\leq Y<18$,绿,中度污染警示; $18\leq Y<22$,青,轻重度污染警示; $22\leq Y<26$,蓝,中重度污染警示; $26\leq Y\leq 30$,紫,重重度污染警示。

强调指出:预警结果不代表真实农田重金属污染状况,只是对污染驱动力相对划分的结果,以此表示未来农田重金属存在污染风险的方向和强弱,它与农田重金属污染预测和预报不同,预测是建立在农田土壤重金属污染数据基础之上的估计,预报是针对突发事件对农田土壤重金属短时间影响的推测。

3.2 省级重金属综合污染预警系统

预警单元:每个省的县(市、区)为基本预警单元,即县级行政单位,预警单元数为县的数量。

预警目的:综合预警,为省战略规划的制定提供参考依据。

预警指标:县最近3~5 a粮食平均季单产、县最近3~5 a平均耕地人口密度、县最近3~5 a平均耕地工业产值。工业和经济开发区和其他特殊区域可以标注在预警图上,并用相应的英文缩写表示(提示:省内耕地面积较小的行政单元作为城市用地考虑,不参于预警分级或作为特殊预警单元)。

预警值计算方法:同3.1。

预警等级划分方法:分1~7级,并分别用“红橙黄绿青蓝紫”七种颜色表示,分别命名为C1红、C2橙、C3黄、C4绿、C5青、C6蓝、C7紫,C为县(County)的英文缩写。

3.3 县级重金属单一污染预警系统

预警单元:每个县的乡镇为基本预警单元,单元数为乡镇的数量。

预警目的:单一预警;可能形成多套预警系统,如可分别建立镉、铅、砷、铬、铜、锌、汞、镍预警系统,可为县具体防治农田重金属污染提供参考依据。

预警指标:乡镇最近3~5 a粮食平均季单产、乡

镇最近3~5 a平均耕地人口密度、乡镇最近3~5 a平均耕地工业产值。以下相关影响因素可以分别标注在预警图上。污灌影响范围确定:按实际污灌范围进行文字说明并图示,图中用I(Irrigation)表示。省级以上交通线影响范围确定:按每侧1 km计算,进行文字说明并图示,图中用H(Highway)表示。污染水体两侧或周边影响范围确定:按每侧3 km或周边3 km计算,进行文字说明并图示,图中用R(River)或L(Lake)表示。城郊区影响范围确定:与城市接壤的所有下级行政单元,用S(Suburb)表示。矿山区影响范围确定:以实际可影响的范围为准,用M(Mine)表示。养殖基地影响范围确定:确定为1 km,用C(Culture)表示。其他情况:需要考虑的其他情况都需要进行文字说明并图示,并用相应的英文首字母表示,当首字母重复时考虑使用英文全称或简称。

预警值计算方法:同3.1。

预警等级划分方法:分1~7级,并分别用“红橙黄绿青蓝紫”7种颜色表示,分别为T1红-具体重金属、T2橙-具体重金属、T3黄-具体重金属、T4绿-具体重金属、T5青-具体重金属、T6蓝-具体重金属、T7紫-具体重金属,T为乡镇(Town)的英文缩写。

3.4 重金属预警系统连续命名方法

国家级命名方法:P1红、P2橙、P3黄、P4绿、P5青、P6蓝、P7紫。省级命名方法:C1红、C2橙、C3黄、C4绿、C5青、C6蓝、C7紫,可以标注特殊区域。县级命名方法:T1红-具体重金属、T2橙-具体重金属、T3黄-具体重金属、T4绿-具体重金属、T5青-具体重金属、T6蓝-具体重金属、T7紫-具体重金属,可以标注I、H、R、L、S、M特殊区域,如T4绿-Pb-I-H代表污灌、交通同时影响“T4绿-Pb”区域。

连续命名方法:如“P5青-C6蓝(可以标注特殊区域)-T4绿-Cd-I”表示省级农田重金属污染处于5级、县级农田重金属污染处于6级、乡镇农田重金属污染处于4级的Cd污染的污灌区。由此可根据小尺度到大尺度的重金属污染级别评价本区域污染风险强度。

4 中国农田重金属污染预警实例

4.1 国家级农田重金属综合污染预警结果

根据表1预警指标、2006—2010年5 a的统计资料 and 式(5)和(6),计算获得全国省级预警结果如表2。3个指标的计算方法如下:

单产相对值 $=(\text{某省单产}-\text{省最低单产 } 3\ 390)/(\text{省}$

表 2 全国农田重金属污染预警结果^[35]
Table 2 Warning results of farmland heavy metal pollution in national in China

代码 Code	省别 Province	单产 Yield/ kg·km ⁻²	相对值 Relative Value/%	人口 Population/ 万人·km ⁻²	相对值 Relative value/ %	工业产值 Industrial output/亿元·km ⁻²	相对值 Relative value/%	警值 Warning data	状态 State
P1 红	甘肃	3 390	0	0.542 9	3	0.630 2	1	0.4	警戒线以下
	青海	3 657	8	0.923 6	9	1.376 2	2	1.8	
	山西	3 734	10	0.804 8	7	1.772 0	2	2.0	
	陕西	3 761	11	0.835 9	8	1.314 5	2	2.0	
	云南	4 166	23	0.731 1	6	0.664 2	1	3.0	
	海南	4 375	29	1.150 9	12	1.153 8	1	4.3	
	内蒙古	4 824	43	0.320 0	0	0.855 9	1	4.4	
	宁夏	4 903	45	0.527 0	3	0.927 0	1	4.9	
P2 橙	贵州	4 888	45	0.798 8	7	0.550 8	1	5.2	警戒线以下
	河北	4 691	39	1.071 3	11	2.709 5	3	5.3	
	黑龙江	5 217	54	0.324 0	0	0.528 8	1	5.5	
	广西	4 936	46	1.107 0	12	1.092 1	1	5.9	
	安徽	5 142	52	1.045 0	11	1.472 7	2	6.5	
	西藏	5 465	62	0.796 9	7	0.111 5	0	6.9	
	四川	5 289	56	1.123 8	12	1.602 8	2	7.0	
	重庆	5 666	68	1.269 7	14	2.022 6	2	8.4	
	河南	5 698	69	1.176 8	13	2.464 0	3	8.4	
	江西	5 572	65	1.520 4	18	2.191 2	3	8.5	
	新疆	6 200	84	0.522 1	3	0.804 5	1	8.7	
	湖北	5 968	77	1.194 9	13	2.182 6	3	9.2	
	辽宁	6 013	78	1.047 2	11	4.666 4	6	9.5	
	山东	6 055	79	1.243 3	14	6.681 7	9	10.1	
	吉林	6 752	100	0.492 5	3	1.205 4	1	10.4	
P3 黄	湖南	6 119	81	1.662 9	20	2.304 2	3	10.4	轻度警示
	福建	5 640	67	2.602 3	34	9.126 8	12	11.2	
	天津	5 191	54	2.563 2	33	22.186 1	29	11.5	
	江苏	6 256	85	1.574 6	19	10.994 7	14	11.8	
	广东	5 220	54	3.212 9	43	17.907 5	23	12.0	
P4 绿	浙江	6 444	91	2.575 8	33	17.001 0	22	14.6	中度警示
P5 青	北京	5 397	60	6.234 6	87	33.437 0	43	19.0	轻重度警示
P6 蓝	—	—	—	—	—	—	—	—	中重度警示
P7 紫	上海	6 706	100	7.101 1	100	76.798 4	100	30.0	重重度警示

最高单产 6 752-省最低单产 3 390)×100 (7)

耕地人口密度相对值=(某省人口密度-省人口
最低密度 0.320 0)/(省人口最高密度 7.101 1-省人口
最低密度 0.320 0)×100 (8)

耕地工业产值相对值=(某省耕地工业产值-省
耕地工业最低产值 0.111 5)/(省耕地工业最高产值
76.7984-省耕地工业最低产值 0.111 5)×100 (9)

累加每个省的 3 个相对值并除以 10, 获得警值,
其范围为 0~30。

划分结果是:P1 红(0~4.9):甘肃省、青海省、山西
省、陕西省、云南省、海南省、内蒙古区、宁夏区, 8 个;
P2 橙(5.2~9.5):贵州省、河北省、黑龙江省、广西区、
安徽省、西藏区、四川省、重庆市、河南省、江西省、新
疆区、湖北省、辽宁省, 13 个;P3 黄 (10.1~12.0):山东
省、吉林省、湖南省、福建省、天津市、江苏省、广东省,
7 个;P4 绿(14.6):浙江省, 1 个;P5 青(19.0):北京市,
1 个;P6 蓝:0 个;P7 紫(29.9):上海市, 1 个。其中黄
色以上 10 个为警示省, 占 32.3%。

科研永远追逐问题、难点和热点。以 5 个国内相关核心期刊即农业环境科学学报、生态与农村环境学报、环境科学、环境科学学报、生态环境 2006—2010 年的与重金属有关的文章数量为依据,结果表明预警结果与文章分布数量基本吻合。3 篇以上的论文有:广东省 18、北京市 12、江苏省 12、辽宁省 11、河南省 10、贵州省 8、广西区 7、湖南省 6、四川省 6、浙江省 5、上海市 4、山东省 4、河北省 4、云南省 4、天津市 3。轻度警示以上的有 10 个省、区、直辖市:上海、北京、浙江、广东、江苏、天津、福建、湖南、吉林、山东。其中福建省、吉林省论文少于 3 篇,说明这 2 个省相对污染较轻,属局部污染;而论文超过 3 篇的不在轻度警示以上的有 7 个省、区、直辖市:辽宁省 11、河南省 10、贵州省 8、广西区 7、四川省 6、河北省 4、云南省 4,说明为局部污染。

4.2 以河南省为例的省级农田重金属综合污染预警结果

根据表 1 预警指标、2005—2008 年 4 a 的统计资料 and 式(5)和(6),计算获得河南省预警结果如表 3。3 个指标的计算方法如下:

单产相对值=(某县单产-全国最低单产 3 390)/(全国最高单产 6 752-全国最低单产 3 390)×100 (10)

耕地人口密度相对值=(某县人口密度-全国人口最低密度 0.320 0)/(全国人口最高密度 7.101 2-全国人口最低密度 0.320 0)×100 (11)

耕地工业产值相对值=(某县耕地工业产值-全

国耕地工业最低产值 0.111 5)/(全国耕地工业最高产值 76.798 3-全国耕地工业最低产值 0.111 5)×100 (12)

累加每个县的 3 个相对值并除以 10,获得警值,其范围为 0~30。将河南省耕地面积少于 10 000 km² 的县、市、区列为城市区暂不考虑其警示,则实际预警单元为 119 个。具体划分标准同 4.1,划分结果是:C1 红(21 个);C2 橙(64 个);C3 黄(30 个);C4 绿(4 个);C5 青(0 个);C6 蓝(0 个);C7 紫(0 个)。其中黄色以上 34 个为警示县,占 28.6%。污染重的主要分别在经济发达地区的焦作市(平均警值 13.6)、鹤壁市(平均警值 10.7)、信阳市(平均警值 11.0)、许昌市(平均警值 10.4)和漯河市(平均警值 10.0)。其他 12 个地区平均警值从小到大依次为:三门峡市(1.7)、洛阳市(4.6)、平顶山市(4.9)、郑州市(5.1)、南阳市(5.9)、驻马店市(6.8)、开封市(7.0)、安阳市(7.8)、新乡市(9.4)、商丘市(9.6)、周口市(9.6)、濮阳市(9.7)。

另外,按河南省各项指标的最低值和最高值进行了划分。

单产相对值=(某县单产-县最低单产 3 024)/(县最高产量 7 688-县最低单产 3 024)×100 (13)

耕地人口密度相对值=(某县人口密度-县人口最低密度 0.592 8)/(县人口最高密度 3.223 2-县人口最低密度 0.592 8)×100 (14)

耕地工业产值相对值=(某县耕地工业产值-县耕地工业最低产值 935)/(县耕地工业最高产值 49 628-县耕地工业最低产值 935)×100 (15)

表 3 河南省农田重金属污染预警结果^[36]
Table 3 Warning results of farmland heavy metal pollution in Henan Province

代码 Code	警值 Warning data	县别 County
C1 红	0≤Y<5	卢氏县、淅池县、陕县、鲁山县、龙安区、灵宝市、新密市、登封市、洛宁县、宜阳县、淅川县、巩义市、汝阳县、嵩县、方城县、孟津县、泌阳县、林州市、新安县、宝丰县、伊川县
C2 橙	5≤Y<10	桐柏县、栾川县、社旗县、汝州市、西峡县、内乡县、舞钢市、正阳县、叶县、新郑市、卧龙区、兰考县、唐河县、新蔡县、确山县、郟县、开封县、镇平县、邓州市、淮滨县、息县、遂平县、台前县、荥阳市、杞县、禹州市、汝南县、平舆县、南召县、尉氏县、新野县、驿城区、原阳县、内黄县、中牟县、上蔡县、许通县、偃师县、延津县、辉县市、范县、安阳县、宛城区、汤阴县、永城市、扶沟县、舞阳县、长垣县、临颍县、虞城县、卫辉市、西平县、睢县、郸城县、民权县、夏邑县、濮阳县、淮阳县、宁陵县、西华县、沈丘县、商水县、封丘县、太康县
C3 黄	10≤Y<13.9	修武县、柘城县、项城市、睢阳区、平桥区、襄城县、鹿邑县、许昌县、淇县、源汇区、潢川县、鄆城区、召陵区、浚县、梁园区、罗山县、获嘉县、文峰区、清丰县、滑县、新乡县、商城县、鄆陵县、长葛市、南乐县、固始县、光山县、孟州市、溱河区、沁阳市
C4 绿	14.3≤Y<15.5	武陟县、新县、温县、博爱县
C5 青		
C6 蓝		
C7 紫		

注:表 3 按照国家各指标最低值和最高值计算所得;各代码地区警值从小至大顺序排列。

具体划分标准同 4.1, 划分结果是: C1 红(7 个); C2 橙(63 个); C3 黄(34 个); C4 绿(12 个); C5 青(3 个); C6 蓝(0 个); C7 紫(0 个)。其中黄色以上 49 个为警示县, 占 41.2%。污染重的主要分别在经济发达地区, 平均警值分别为焦作市 17.3、漯河市 12.7、郑州市 12.5、许昌市 12.3、鹤壁市 11.8、信阳市 10.7、安阳市 10.6、濮阳市 10.6 和新乡市 10.0。其他 8 个地区平均警值从小到大依次为周口市 9.8、商丘市 9.7、洛阳市 8.9、平顶山市 8.2、南阳市 8.0、开封市 7.3、驻马店市 7.0、三门峡市 5.0。

4.3 县级农田重金属单一污染预警方法

县级农田重金属单一污染预警方法按 3.3 内容和流程操作, 限于篇幅, 本文略。

5 讨论

5.1 重金属预警值标准化

通过 4.1 和 4.2 求得得知: 如果全国不采用统一的、固定的某指标的最高值和最低值, 则预警值将是动态的。各省和各县是否采用全国最高值和最低值进行标准化, 需要具体情况具体分析, 不能一概而论, 但是宗旨是尽量拉开档次以便警示。如果想与全国相比就统一, 否则可以使用各自的标准。

5.2 重金属预警结果的相对性

所选三个预警指标在计算时的权重是相等的, 但实际上它们在不同区域对农田重金属污染作用是不同的, 因此根据其划分的预警结果是相对的。如果全国采用统一标准, 则南方农田重金属污染比北方的严重, P3 以上 10 省、区、市中有 6 个, 且前 5 个中 4 个为南方的省、区、市, 其排序为: 上海、北京、浙江、广东、江苏、天津、福建、湖南、吉林、山东; 经济发达地区的严重, 以上 10 个省中除吉林和湖南外均为经济发达地区; 北京市、天津市污染级别居北方各省之首, 上海市、浙江省、广东省、江苏省居南方各省前位, 这与实际情况基本吻合。

5.3 重金属预警结果动态化和信息化表示方法

以上建立的预警理论和方法, 可以通过信息技术做成在线软件, 每 3~5 a 更新数据, 实现动态预警, 并可通过 GIS 技术以图形方式表示。如果建立全国、省、县三级农田重金属污染预警系统, 则可进一步为农田重金属污染动态监测、预测、管理和防治提供信息技术平台。

5.4 重金属半定量预警模型的思考

本研究所建立的模型方法也可以简化成半定量

的预警方法, 即首先确定本地区上一级行政单元的三个单一指标的最高值和最低值, 然后确定本地区的粮食季单产、耕地人口密度、耕地工业产值三项数据, 根据本文计算方法可求出预警等级, 再根据是否属于工业和经济开发区、城郊区、矿山区、污灌区、交通线、污染水体、养殖基地等, 大致估算出所预测区域的相对污染警级, 如能结合实际观测数据则可相互验证。

6 结论

本文从农田重金属污染的“物质-驱动力-环境因素”的相互关系入手, 提出适合中国国情的农田重金属污染预警的“天-地-人通用概念模型”和相应的预警指标体系, 并以国家级和省级预警实例具体说明了预警系统的使用方法。结果表明: 系统适合中国国情; 预警方法科学、通用、实用、简单, 所需数据容易获得; 所划分的国家级预警等级符合当前我国农田重金属污染基本现状, 以河南省为例的省级预警结果基本反映了该省省情, 即经济发达地区重金属污染预警等级相对较高的共性。

本文的主要结论是: 从理论上建立了国家级、省级和县级统一预警概念模型和预警指标体系, 方法上采用统一的相对指标计算方法、警值计算方法和 7 级警级划分方法, 便于编制软件实时发布预警结果。

参考文献:

- [1] 杨景辉. 土壤污染与防治 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] 陈怀满. 环境土壤学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 周脚根, 宋变兰, 尤冬梅. 土壤重金属污染风险预测研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37 (22): 10617-10619, 10622.
ZHOU Jiao-gen, SONG Bian-lan, YOU Dong-mei. Research Progress on Prediction of Soil Heavy Metal Contamination Risk [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37 (22): 10617-10619, 10622.
- [4] 李国刚. 中国土壤环境监测的现状、问题与对策 [J]. 环境监测管理技术, 2005, 17(1): 8-10.
LI Guo-gang. The status and development needs of soil environmental monitoring in China [J]. *Environmental Monitoring Technology*, 2005, 17 (1): 8-10.
- [5] Lee C S, Li X D, Shi W Z, et al. Metal Contamination in Urban, Suburban, and Country Park Soils of Hong Kong: A study based on GIS and Multivariate Statistics [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 356 (1): 45-61.
- [6] Stein A, Corsten L C A. Universal kriging and cokriging as regression procedure [J]. *Biometrics*, 1991, 47: 575-587.
- [7] Atteia O, Dubois J P, Webster R. Geostatistical analysis of soil contamination in the Swiss Jura [J]. *Environmental Pollution*, 1994, 86: 315-327.
- [8] Arrouays D, Mench M, Amans V, et al. Short range variability of fallout

- Pb in a contaminated soil[J]. *Canada Journal of Soil Science*, 1996, 76: 73-81.
- [9] Carlon C, Critto A, Marcomini A, et al. Risk based characterisation of contaminated industrial site using multivariate and geostatistical tools [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 111:417-427.
- [10] Cattle J A, McBratney A B, Minasny B. Kriging method evaluation for assessing the spatial distribution of urban soil lead contamination[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31:1576-1588.
- [11] Goovaerts P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation[M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [12] Meuli R, Schulin R, Webster R. Experience with the replication of regional survey of soil pollution[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 101: 311-320.
- [13] Van Meirvenne M, Goovaerts P. Evaluating the probability of exceeding a site specific soil cadmium contamination threshold[J]. *Geoderma*, 2001, 102:75-100.
- [14] Von Steiger B, Webster R, Schulin R, et al. Mapping heavy metals in polluted soil by disjunctive kriging[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94:205-215.
- [15] 颜卫忠.环境预警指标体系研究[J].长沙电力学院学报, 2002, 17(3):87-90.
YAN Wei-zhong. Study of the environment alarming index system[J]. *Journal of Changsha University of Electric Power*, 2002, 17(3):87-90.
- [16] 周国华, 田黔宁, 孙彬彬, 等.生态地球化学预测预警若干问题探讨[J].地质通报, 2009, 28(1):118-123.
ZHOU Guo-hua, TIAN Qian-ning, SUN Bin-bin, et al. Discussion on ecologic geochemical early-warning and forecasting[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(1):118-123.
- [17] 陈国阶.对环境预警的探讨[J].重庆环境科学, 1996, 18(5):1-4.
CHEN Guo-jie. An approach on environmental warning[J]. *Chongqing Environment Science*, 1996, 18(5):1-4.
- [18] 范迪福, 翁志华.江苏省溧水县土壤环境污染预警预测方法探讨[J].江苏地质, 2005, 29(2):88-93.
FAN Di-fu, WENG Zhi-hua. Discussions on prediction and precaution methods for soil environment pollution in Lishui County, Jiangsu Province [J]. *Jiangsu Geology*, 2005, 29(2):88-93.
- [19] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥, 等.长春市城区土壤重金属污染趋势预测预警[J].城市环境与城市生态, 2010, 23(3):1-4.
YANG Zhong-ping, LU Wen-xi, LONG Yu-qiao, et al. Prediction and precaution of heavy metal pollution trend in urban soils of Changchun City[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2010, 23(3):1-4.
- [20] 肖莉, 温贤有, 张国权, 等.广东省土壤重金属污染监测预警系统的设计[J].广东农业科学, 2010(4):243-245.
XIAO Li, WEN Xian-you, ZHANG Guo-quan, et al. Design of the monitoring and warning system for soil heavy metal pollution in Guangdong[J]. *Guangdong Agri-Science*, 2010(4):243-245.
- [21] 易秀, 郭婷婷, 谷晓静.陕西省泾惠渠灌区土壤重金属污染累积趋势预测[J].生态环境学报, 2010, 19(9):2209-2213.
YI Xiu, GUO Ting-ting, GU Xiao-jing. The prediction of accumulation trend for soil pollution of heavy metals in Jinghuiqu irrigation district of Shaanxi[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(9):2209-2213.
- [22] 李勇, 周永章, 窦磊, 等.珠江三角洲平原广东省佛山市顺德区土壤-蔬菜系统中Pb的健康安全预测预警[J].地质通报, 2010, 29(11):1662-1676.
LI Yong, ZHOU Yong-zhang, DOU Lei, et al. Prediction and early-warning for health safety of lead in soil and vegetable system, the Pearl River Delta Plain, Southern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(11):1662-1676.
- [23] 邵学新, 黄标, 孙维侠, 等.长江三角洲典型地区工业企业的分布对土壤重金属污染的影响[J].土壤学报, 2006, 43(3):397-404.
SHAO Xue-xin, HUANG Biao, SUN Wei-xia, et al. Effect of industrial distribution on soil heavy metal accumulation in a typical area of the Yangtze River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):397-404.
- [24] 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[J].土壤学报, 2007, 44(6):974-981.
ZHAO Yong-cun, HUANG Biao, SUN Wei-xia, et al. Uncertainty assessment of the spatial patterns of copper contents in topsoil in Zhangjiagang City, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6):974-981.
- [25] 吴春发, 吴嘉平, 骆永明, 等.冶炼厂周边土壤重金属污染范围的界定与不确定性分析[J].土壤学报, 2009, 46(6):1006-1012.
WU Chun-fa, WU Jia-ping, LUO Yong-ming, et al. Identification and uncertainty analysis of scope of heavy metal pollution in the vicinity of secondary copper smelteries[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6):1006-1012.
- [26] 杨娟, 王昌全, 李冰, 等.基于BP神经网络的城市边缘带土壤重金属污染预测:以成都平原土壤Cd为例[J].土壤学报, 2007, 44(3):430-436.
YANG Juan, WANG Chang-quan, LI Bing, et al. Prediction of soil heavy metal pollution of peri-urban zone based on BP artificial neural network: A case study of the Chengdu Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3):430-436.
- [27] 廖国礼, 周音达, 吴超.尾矿区重金属污染浓度预测模型及其应用[J].中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(6):1009-1013.
LIAO Guo-li, ZHOU Yin-da, WU Chao. Forecast Models of heavy metal contamination near tailing dam and their application[J]. *J Cent South Univ(Science and Technology)*, 2004, 35(6):1009-1013.
- [28] 王加恩, 康占军, 潘卫丰, 等.浙北嘉善县1990-2008年土壤重金属元素及酸碱度变化和趋势预测[J].地质科技情报, 2010, 29(1):92-96.
WANG Jia-en, KANG Zhan-jun, PAN Wei-feng, et al. Content change and forecast of heavy metal and pH value in soil for Jiashan area, northern Zhejiang Province from 1990 to 2008 [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(1):92-96.
- [29] 严加永, 吕庆田, 葛晓立. GIS支持下的土壤重金属污染预测预警研究[J].吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(3):592-596.
YAN Jia-yong, LÜ Qing-tian, GE Xiao-li. The Research about soil heavy metal pollution forecast and early warning support by GIS[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2007, 37(3):592-596.

- [30] 何绘宇, 夏 斌, 陈琴俐, 等. 珠江三角洲土壤重金属预警与决策支持信息系统设计[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):13-16.
HE Hui-yu, XIA Bin, CHEN Qin-li, et al. Early-warning and decision-making system for heavy metals in soils of Pearl River Delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl):13-16.
- [31] 檀满枝, 陈 杰, 郑海龙, 等. 模糊 c-均值聚类法在土壤重金属污染空间预测中的应用[J]. 环境科学学报, 2006, 26(12): 2086-2092.
TAN Man-zhi, CHEN Jie, ZHENG Hai-long, et al. Spatial prediction of soil heavy metal pollution using fuzzy c-mean algorithm [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12):2086-2092.
- [32] 凌 辉, 武 伟, 王 润, 等. 小尺度下土壤重金属铬含量的空间插值方法比较研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(11): 93-99.
LING Hui, WU Wei, WANG Run, et al. A comparative analysis of various spatial interpolation methods for soil chrome content on a small scale[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2007, 29(11): 93-99.
- [33] 侯彦林, 李红英, 周永娟, 等. 中国农田氮面源污染研究: II 污染评价指标体系的初步制定[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1277-1282.
HOU Yan-lin, LI Houg-ying, ZHOU Yong-juan, et al. Nitrogen non-point field pollution in China: II Establishment of index system for evaluation of pollution degree[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1277-1282.
- [34] 侯彦林, 赵慧明, 李红英, 等. 中国农田氮面源污染研究: III 估算模型的实证[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7):1337-1340.
HOU Yan-lin, ZHAO Hui-ming, LI Hong-ying, et al. Nitrogen non-point field pollution in China: III Demonstration of the model[J]. *Journal of Agri-Environment Science*, 2009, 28(7):1337-1340.
- [35] 中华人民共和国国家统计局网站.[2011-09-03]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.
- [36] 河南省经济社会发展统计年鉴数据库.[2011-09-05]. <http://tongji.cnki.net/kns55/areasheng.aspx?areacode=xj16&grade=1>

致谢:感谢周炜、周燕在资料收集和数据处理方面的帮助。