

重金属污染土壤 – 作物系统协同评价模型及在煤矿区农田污染中应用

张合兵¹, 马守臣¹, 王 锐¹, 马守田², 王新闯¹, 邵 云²

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院国土资源部野外科学观测研究基地, 河南 焦作 454000;
2. 河南师范大学 生命科学院, 河南 新乡 453007)

摘 要: 为科学评价农田重金属污染风险, 本研究在分别进行土壤和作物污染评价的基础上, 提出了可同时反映农田生态安全、生产安全和农产品质量安全的重金属污染风险评价模型——土壤 – 作物系统协同评价模型, 并对焦作矿区农田重金属污染进行了科学评价。结果表明, 根据生态风险指数法对土壤污染风险进行评价, 矿井水污灌农田(F1 样地)和煤矸石污染农田(F2 样地)综合生态风险指数分别为 239.60 和 178.42, 达到中等水平, 在矿区公路侧农田(F3 样地)土壤达到轻微生态风险水平。根据综合污染指数法对小麦(*Triticum aestivum*)籽粒中重金属污染进行评价, F1、F2 和 F3 三个样地小麦籽粒中重金属污染综合指数均达到重度污染水平。采用土壤 – 植物系统协同评价模型对重金属污染农田进行风险评价, F1 样地的污染等级分值为 48.4, 达到重度污染水平、F2 样地的污染等级分值为 54.4, 达到中度污染水平、F3 样地的污染等级分值 76.8, 为轻度污染水平。

关键词: 土壤 – 作物系统; 重金属污染; 协同评价; 冬小麦
中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A

A model for synergetic assessment of soil – plant system in heavy metal contamination farmland and its application in a coal mining area

ZHANG He-bing¹, MA Shou-chen¹, WANG Rui¹, MA Shou-tian², WANG Xin-chuang¹, SHAO Yun²

(1. Field Scientific Observation and Research Base of Ministry of Land and Resources, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan 454000, China; 2. College of Life Science, He'nan Normal University, Xinxiang, He'nan 453007, China)

Abstract: To scientifically evaluate risks of heavy metal contamination on farmlands in the coal mining areas, we introduced a synergetic assessment model for heavy metal contamination in soil-plant system on the basis of farmland ecological safety, crop production safety and quality safety of agricultural products. The results showed that, according to the ecological risk index of heavy metal pollution, the soil comprehensive ecological risk index was 239.60 for F1 sample plot (mine water contaminated farmland), and 178.42 for F2 sample plot (the coal waste rock contaminated farmland), both of which reached moderate risk levels. The soil comprehensive ecological risk index of F3 sample plot (farmland close to the highway) reached subtle risk level. For wheat grains, the heavy metal comprehensive contamination indexes all reached severe risk levels in F1, F2 and F3 sample plots. According to synergetic assessment model of soil – plant system, the value of pollution degree in F1 sample plot was for 48.4, reaching a high risk level; the value in F2 sample plot was for 54.4, as a moderate risk level; and the value F3 sample plot was for 76.8, at a subtle risk level.

Keywords: soil-plant system; heavy metal contamination; synergetic assessment; winter wheat

据统计,我国有 1/5 的农田土壤受到污染,其中重金属污染土壤约占污染农田总面积的 30% ~ 40%^[1],并呈现污染加剧的趋势。重金属污染物一方面通过影响土壤微生物区系、生态物种种类和微生物过程,进而影响生态系统的结构与功能;另一方面,土壤重金属污染通过影响粮食、蔬菜等作物品质,经人体食物链,造成人体健康风险^[2-4]。近年来重金属污染问题已引起广泛的关注,国内外学者针

收稿日期: 2014-03-31
基金项目: 科技部公益性行业(国土)科研专项课题(201411022-2)
作者简介: 张合兵(1975—),男,博士,副教授,主要从事土地生态方面的研究工作。
通信作者: 马守臣(1972—),男,博士,副教授,主要从事农田生态治理与修复方面的研究工作。E-mail: mashouchen@126.com。

对土壤重金属污染特征和生态风险进行了大量研究^[5-8],但在对农田重金属污染进行评价研究中经常发现,土壤污染评价结果与作物污染评价结果并不一致,土壤超标而作物不超标,或土壤不超标而作物超标的现象时常出现。重金属对于作物的毒性不仅与土壤重金属全量有关,而且与土壤质地、理化性质、重金属赋存状态密切相关^[9-10]。不同植物对于重金属的吸收、累积特性也有很大差异。此外,土壤并非作物重金属的唯一来源,大气和农药也可作为作物带来重金属污染,植物地上部分可吸收大气中汞、铅等重金属元素。因此,植物累积重金属量还受大气等环境污染状况的影响。再者,在作物生产方面,土壤重金属污染还将通过影响土壤的生态功能,影响到农田水分、养分循环过程,最终造成作物减产或甚至死亡。可见,以土壤重金属全量为标准难以反映农田重金属污染真实水平,正确评价农田重金属污染特征,应当结合作物效应作关联评价。

煤矿区在为国家提供了能源支撑的同时,引发的生态与环境问题也日益凸现。采矿过程中产生的煤矸石和矿井废水等废弃物含有大量的 Pb、Zn、Cr、Cd 等重金属元素,它们在长期堆积和排放过程中,这些重金属元素经雨水及风力等,迁移到周围农田中对土壤造成污染^[11-12]。近年来矿区环境污染评价已成为我国目前环境污染领域的研究热点问题之一。李海霞等对淮南某废弃矿区污染场的土壤重金属污染风险进行了评价^[13];王莹等对徐州矿区充填复垦地重金属污染的潜在生态风险进行评价^[14];董霁红等对矿区复垦土壤种植小麦的重金属安全性进行了评价^[15]。但以上这些研究均是以土壤或者作物中重金属含量单一指标来进行评价,缺乏土壤和作物间的关联评价,评价结果难以反映农田重金属污染真实水平。因此,为了科学评价农田土壤重金属污染程度,本研究在分析各种评价模型特点的基础上,提出了基于农田生态、生产安全和农产品质量安全的重金属污染风险评价模型——土壤-作物系统协同评价模型,并以焦作市中马村矿区的矿区农

田为研究对象,通过对矿区内典型农田土壤及农作物中重金属 Pb、Cu、Zn、Cr、Cd 含量进行测定,并结合作物产量效应,对其重金属污染情况进行风险评价,以期科学治理矿区污染农田,确保矿区农田生态、生产安全和农产品质量安全提供依据。

1 评价模型

当前的土壤污染评价研究仅以土壤重金属全量单一指标定论,缺乏植物效应同步证明^[16]。而土壤污染评价结果与作物污染评价结果常不一致,土壤重金属全量难以反映土壤污染真实水平。因此,本研究在分别进行土壤和作物污染评价的基础上,提出了可同时反映矿区农田生态安全、生产安全和农产品质量安全的重金属污染风险评价模型——土壤-植物系统协同评价模型。评价模型如下:

$$FQ = w_s \times SI + w_c \times CI + w_y \times Y \tag{1}$$

式中, FQ 为农田污染程度分值; w_s 是土壤污染风险权重; w_c 作物污染风险权重; w_y 是产量减少率权重,各指标权重通过专家打分法结合层次分析法确定; SI 是土壤污染风险分值; CI 是作物污染风险分值; Y 是作物产量减少率(y)的分值, y 为污染农田产量与周围未污染或远离污染源农田产量平均值相比减少的百分比。 Y 值由 y 对应表 1 中分级标准确定, SI 、 CI 分值由公式(2)、(3) 计算出的指数 I_s 、 I_c 值对应表 1 中分级标准确定。各指标的分级标准及权重如表 1。根据农田污染程度分值 FQ ,将重金属污染分为 5 个等级,如表 2。

1) 土壤生态风险指数(I_s)。

以土壤元素背景值作为标准,采用潜在生态风险指数法(Hankson 指数法)对矿区土壤重金属污染的生态风险进行评价,该方法将重金属的含量、生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采用具有可比的等价值属性指数分级法进行评价,可以定量评价单一元素的风险等级,也可以评价多个元素的总体风险等级。

表 1 重金属污染评价指标作用分值判定标准及权重
Table 1 Weights and the judging standards of heavy metal pollution indexes

评价指标 Evaluation indexes	指标作用分值 Score of index					指标权重 w Index weight
	100	80	60	40	20	
土壤风险指数(I_s)分级值 The judging standards of soil risk indexes	< 50	≥ 50 ~ 150	≥ 150 ~ 300	≥ 300 ~ 600	≥ 600	0.41
作物污染指数(I_c)分级值 The judging standards of crop pollution indexes	≤ 0.7	> 0.7 ~ 1.0	> 1.0 ~ 2.0	> 2.0 ~ 3.0	> 3.0	0.29
产量减少率(y)分级值 The judging standards of yield reduction rate	≤ 10%	> 10% ~ 20%	> 20% ~ 30%	> 30% ~ 40%	> 40%	0.30

表 2 重金属污染等级分级标准
Table 2 Criteria for heavy metal pollution degrees

项目 Item	未受污染 Non-polluted	轻度污染 Low polluted	中度污染 Moderate polluted	重度污染 Severe polluted	极度污染 Extreme polluted
分值区间 The classification criterion	≥85	≥70 ~ 85	≥50 ~ 70	≥30 ~ 50	< 30

计算公式:

$$I_s = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i}) \tag{2}$$

式中, I_s 为土壤中重金属潜在的生态风险指数; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数; T_r^i 第 i 种重金属的毒性相应系数($Cu = 5, Zn = 1, Cd = 30, Pb = 5, Cr = 2$); C_i 为表层土壤中第 i 种重金属含量的实测值; C_n^i 土壤元素背景值。 E_r^i 描述某一污染物(元素)的污染程度,分为 5 个等级: $E_r^i < 40$ 轻微生态危害; $40 \leq E_r^i < 80$ 中等生态危害; $80 \leq E_r^i < 160$ 强生态危害; $160 \leq E_r^i < 320$ 很强生态危害; $E_r^i \geq 320$ 极强生态危害。 I_s 描述某一点多个污染物潜在生态危害系数的综合值,分为 4 个等级: $I_s < 150$ 轻微生态危害; $150 \leq I_s < 300$ 中等生态危害; $300 \leq I_s < 600$ 强生态危害; $I_s \geq 600$ 很强生态危害^[17]。

2) 作物综合污染指数(I_c),计算公式:

$$I_c = \sqrt{(I_{imax}^2 + I_{imean}^2)/2} \tag{3}$$

式中, I_c 为作物中 i 个重金属元素综合污染指数; I_{imax} 为作物所有重金属元素中最大的污染指数; I_{imean} 为作物中各重金属元素污染指数平均值。评价标准为, $I_c \leq 0.7$ 表示未受污染; $0.7 < I_c \leq 1.0$ 达到警戒水平; $1.0 < I_c \leq 2.0$ 轻度污染; $2.0 < I_c \leq 3.0$ 中度污染; $I_c > 3.0$ 重度污染, I_i 由单项污染指法计算^[15-16]。

3) 单项污染指法(I_i),计算公式:

$$I_i = C_i / C_0 \tag{4}$$

式中, I_i 为污染物 i 单因子指数; C_i 为污染物 i 的实测浓度; C_0 为污染物 i 的评价标准。依据评价标准, $I_i \leq 1$ 表示未受污染; $1 < I_i \leq 2$ 轻度污染; $2 < I_i \leq 3$ 中度污染; $I_i > 3$ 重度污染^[6]。

2 模型应用分析

2.1 试区概况

评价区选取焦作煤业集团中马村矿区,矿区位置位于焦作市东郊。在矿区内选取三处典型农田作为评价对象:F1(位于矿区洗煤废水排放口处,长期进行矿区废水灌溉);F2(位于矸石山附近,距矸石山约 50 m);F3(距矿井约 300 m,位于通往矿井区的公

路两侧)。土壤类型均为砂壤土,受长期酸性矿井废水的影响,试验田土壤 pH 值为 6.3 ~ 6.5。

2.2 样品采集及测定

于冬小麦(*Triticum aestivum*)成熟期采用蛇形采点取样,每区各取 5 个土样和植物样品,土壤样品为 0 ~ 20 cm 表层土,并在土壤样附近取 1 m² 小麦测产。采集的土壤样品,放在通风处风干,风干后研磨并通过 2 mm(20 目)尼龙筛子,再从中取出大约 200 g,研磨至全部过 0.149 mm(100 目)的尼龙筛子,保存于塑料袋中,混匀待测。小麦植株样品用去离子水反复水洗,洗净后于 60℃ ~ 80℃ 烘至恒重,用 FZ102 微型植物试样粉碎机粉碎待测。所有样品经 HNO₃ - HClO₄(4:1)消解后,采用原子吸收分光光度法、火焰法测定样中的 Cr、Zn、Pb、Cd、Cu 的含量。分析过程中加入国家标准参比物质土壤样品(GBW08303)和植物样品(GBW08513)进行分析质量控制,各元素测定值均在国家标准物质的允许误差范围内。分析过程中所用试剂均为优级纯。

3 结果与分析

3.1 土壤中重金属含量

表 3 为矿区土壤中 5 种重金属的含量以及河南省的土壤元素背景值。与背景值比较,F1 和 F2 样区土壤中除 Cu 以外,Cr、Zn、Pb、Cd 含量的实测值均高于河南省的土壤元素环境背景值。F3 样区土壤中 Pb 和 Cd 含量的实测值高于环境背景值,Cu、Cr 和 Zn 含量的实测值低于背景值。与国家土壤环境质量二级标准(GB15618 - 1995)比较,F1 和 F2 样区土壤中 Zn、Cd、Cr 含量的实测值均高于国家二级标准,Cu 和 Pb 含量低于国家二级标准;F3 样区土壤中 所测五种重金属元素含量的实测值均低于国家二级标准。

3.2 土壤重金属污染风险评价

由单项风险指数的评价结果(表 4)可知,F1 样地中土壤 Cd 的含量达到很强生态风险水平,Zn、Cr、Cu 和 Pb 的含量达到轻微生态风险水平。F2 样地中土壤 Cd 的含量达到强生态风险水平,Zn、Cr、Cu 和 Pb 的含量达到轻微生态风险水平。在 F3 样地土壤中除 Cd 未测出以外,Zn、Cr、Cu 和 Pb 的含量均达

到轻微生态风险水平。从综合的潜在生态风险指数来看, F1 和 F2 样地综合生态风险指数分别为 239.60和 178.42,达到中等水平, F3 样地土壤达到轻微生态风险水平。

表 3 土壤重金属含量、背景值和土壤质量评价/(mg•kg⁻¹)

Table 3 Heavy metal contents in soil, background values and quality evaluations

样地 Sample plots	项目 Item	Zn	Pb	Cd	Cr	Cu
	背景值 Background value	≤74.2	≤19.6	≤0.09	≤63.8	≤19.7
	二级标准 Secondary standard	≤200	≤250	≤0.3	≤150	≤50
F1	实测值 Measured value	460.85 ± 11.5	94.85 ± 8.2	0.61 ± 0.05	1160.95 ± 10.1	3.19 ± 0.7
F2	实测值 Measured value	245.20 ± 12.3	49.15 ± 7.4	0.47 ± 0.11	157.27 ± 14.5	5.08 ± 0.5
F3	实测值 Measured value	42.49 ± 4.5	35.79 ± 2.1	ND	116.02 ± 6.3	4.39 ± 1.2

注:ND 表示未测出。Note: ND represents that heavy metal was not detected.

表 4 矿区重金属污染土壤的生态风险评价

Table 4 Risk assessments of heavy metal polluted soil in coal mining area

样地 Sample plots	单项风险指数 E_i^r Single risk index						综合风险指数 RI Comprehensive risk index
		Zn	Pb	Cd	Cr	Cu	
F1	指数值 Index value	6.21	24.20	203.33	5.045	0.81	239.60
	等级 Pollution level	轻微 Slight	轻微 Slight	很强 Severe	轻微 Slight	轻微 Slight	中等 Moderate
F2	指数值 Index value	3.30	12.54	156.67	4.62	1.29	178.42
	等级 Pollution level	轻微 Slight	轻微 Slight	强 High	轻微 Slight	轻微 Slight	中等 Moderate
F3	指数值 Index value	0.57	9.13	—	3.64	1.11	14.45
	等级 Pollution level	轻微 Slight	轻微 Slight	—	轻微 Slight	轻微 Slight	轻微 Slight

3.3 小麦籽粒中重金属风险评价

重金属元素在籽粒中积累并通过食用进入人体后将在体内富集,严重时可能引发疾病。参照中华人民共和国国家标准粮食卫生标准(GB2715 – 2005)得到小麦中重金属含量的限量标准见表 5。通过对小麦籽粒中的重金属含量进行测定,在 F1、F2 和 F3 三个样地中,Zn、Pb、Cr 在小麦中的含量,均高于限量标准(表 5),Cu 在小麦中的含量,均低于限量标准。在 F1 和 F2 样地中,Cd 的含量均高于限量标准。在 F3 样地中,Cd 在籽粒中的含量未测出。以该限量标准,采用单项污染指数和综合污染指数法对小麦籽粒中重金属风险进行评价,从评介结果(表 5)可知,在 F1 样地中,小麦籽粒中 Zn 含量达到轻度污染水平,Pb、Cd 和 Cr 含量达到重度污染水平,Cu 含量未达到污染水平。在 F2 样地中,小麦籽粒中 Zn 含量达到中度污染水平,Pb、Cd 和 Cr 含量达到重度污染水平,Cu 含量未达到污染水平。在 F3 样地中,小麦籽粒中 Zn 含量达到轻度污染水平,Pb、Cr 含量达到重度污染水平,Cd 和 Cu 含量未达到污染水平。从综合污染指数评价来看,F1、F2 和 F3 三个样地小麦籽粒中重金属污染综合指数均达到重度污染水平。

3.4 土壤 – 植物系统协同评价

在矿区周围远离污染源选取品种、耕作措施和农田管理一致的农田小麦平均产量作为标准,通过比较分析三个样地的小麦产量,F1、F2 和 F3 样地的产量减少率分别为 24.3%、16.2% 和 8.9%(表 6)。结合表 1 可知,F1 和 F2 样地的土壤污染风险分值为 60、F3 样地的土壤污染风险分值为 100。F1、F2 和 F3 样地的作物污染风险分值均为 20。F1、F2 和 F3 样地的产量减少率分值分别为 100、80 和 60(表 6)。采用土壤 – 植物系统协同评价法对污染农田进行风险评价,F1、F2 和 F3 样地的污染等级分值分别为 48.4、54.4 和 76.8,根据污染评价等级标准(表 2),土壤 – 植物系统协同评价结果为:F1 样地达到重度污染水平、F2 样地达到中度污染水平、F3 样地达到轻度污染水平(表 6)。

4 结 论

1) 本研究在分别进行土壤和作物污染评价的基础上,结合作物产量效应,提出了可同时反映矿区农田生态安全、生产安全和农产品质量安全的重金属污染风险评价模型,并建立了农田污染程度分级标准。

表 5 小麦籽粒中重金属风险评价

Table 5 Heavy metal risk assessment results for wheat grains

样地 Sample plots	单项污染指数 Single pollution index						综合污 染指数 Comprehensive pollution index
	项目 Item	Zn	Pb	Cd	Cr	Cu	
	限量标准/(mg·kg ⁻¹) Limit standard	50	0.2	0.1	1.0	10	
F1	实测值/(mg·kg ⁻¹) Measured value	97.76 ± 4.13	28.70 ± 6.92	0.39 ± 0.32	36.60 ± 8.34	2.79 ± 0.78	
	指数值 Index value	1.96	193.5	3.9	36.6	0.28	125.01
	等级 Pollution level	轻度污染 Slight	重度污染 High	重度污染 High	重度污染 High	未污染 Non-polluted	重度污染 High
F2	实测值/(mg·kg ⁻¹) Measured value	102.55 ± 10.45	39.64 ± 4.84	0.31 ± 0.03	36.65 ± 3.65	5.11 ± 0.95	
	指数值 Index value	2.05	198.2	3.1	36.65	0.511	126.57
	等级 Pollution level	中度污染 Moderate	重度污染 High	重度污染 High	重度污染 High	未污染 Non-polluted	重度污染 High
F3	实测值/(mg·kg ⁻¹) Measured value	77.06 ± 10.31	33.10 ± 5.91	ND	28.93 ± 4.11	3.16 ± 0.58	
	指数值 Index value	1.54	165.5	—	28.93	0.316	116.69
	等级 Pollution level	轻度污染 Slight	重度污染 High	未污染 Non-polluted	重度污染 High	未污染 Non-polluted	重度污染 High

表 6 重金属污染农田土壤－作物系统协同评价

Table 6 Synergetic assessments of heavy metal contamination in soil－crop systems in the coal mining areas

样地 Sample plots	土壤污染风险 Soil pollution risk		作物污染风险 Crop pollution risk		产量 Yield		污染等级 分值(FQ) Pollution value	污染等级 Pollution level
	指数值(I _s)	分值	指数值(I _c)	分值	减少率(γ)	分值		
	Index value	Value	Index value	Value	Yield reduction rate	Value		
F1	239.60	60	125.01	20	24.3%	60	48.4	重度污染 High
F2	178.42	60	126.57	20	16.2%	80	54.4	中度污染 Moderate
F3	14.45	100	116.69	20	8.9%	100	76.8	轻度污染 Slight

2) 采用生态风险指数法对土壤重金属污染风险进行评价的结果表明,F1 和 F2 样地综合生态风险指数达到中等水平,F3 样地土壤达到轻微生态风险水平。采用综合污染指数法对小麦籽粒中重金属风险进行评价的结果表明,F1、F2 和 F3 三个样地小麦籽粒中重金属污染综合指数均达到重度污染水平。土壤污染评价结果与作物污染评价结果不一致,以土壤或作物中重金属全量单一指标难以反映农田污染真实水平。

3) 采用土壤－植物系统协同评价模型对重金属污染农田进行风险评价,F1 样地的污染等级分值为 48.4,达到重度污染水平、F2 样地的污染等级分值为 54.4,达到中度污染水平、F3 样地的污染等级分值 76.8,为轻度污染水平。

参 考 文 献:

[1] 陈惠芳,李艳,吴豪翔,等.富阳市不同类型农田土壤重金属变异特征及风险评价[J].生态与农村环境学报,2013,29(2):

164-169.

[2] Li Z W, Li L Q, Pan G X, et al. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: soil type versus genotype effects[J]. Plant and Soil, 2005,271(1/2): 165-173.

[3] 冯绍元,邵洪波,黄冠华.重金属在小麦作物体中残留特征的田间试验研究[J].农业工程学报,2002,18(4): 113-115.

[4] 刘建国,李坤权,张祖建,等.水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J].应用生态学报,2004,15(2):291-294.

[5] 郭平,谢忠雷,李军,等.长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J].地理科学,2005,25(1):108-112.

[6] 施加春,刘杏梅,于春兰,等.浙北环太湖平原耕地土壤重金属的空间变异特征及其风险评价研究[J].土壤学报,2007,44(5): 824-830.

[7] Koz B, Cevik U, Akbulut S. Heavy metal analysis around murgul (artvin) copper mining area of turkey using moss and soil[J]. Ecological Indicators, 2012,20(9): 17-23.

[8] Ngole V M, Ekosse G I E. Copper, nickel and zinc contamination in soils within the precincts of mining and landfilling environments[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2012, 9(3):485-494.

[9] Naidu R, Kookana R S, Sumner M E. Cadmium sorption and transport invariable charge soils[J]. Environ. Qual, 1997,26:602-617.

析有一定局限性,但是利用灌溉来减低干旱风险,相对控制气温、改良品种等是最可行的方法。

参 考 文 献:

[1] 谭宗琨,吴全衍.影响广西原料蔗产量的主要气象因子及产量预报研究[J].广西农业科学,1994,1(3):108-111.

[2] 陈如凯,张木清,陆裔波.干旱胁迫对甘蔗生理影响的研究[J].甘蔗,1995,2(1):1-6.

[3] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等.气象、农业干旱指标综述[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):185-189.

[4] 赵海燕,张 强,高 歌,等.中国 1951-2007 年农业干旱的特征分析[J].自然灾害学报,2010,19(4):201-206.

[5] 郭 锐,智协飞.中国南方旱涝时空分布特征分析[J].气象科学,2009,29(5):598-605.

[6] 邹旭恺,任国玉,张 强.基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J].气候与环境研究,2010,15(4):371-378.

[7] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,等.东北地区玉米干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):231-236.

[8] 刘 静,王连喜,马力文,等.中国西北旱作小麦干旱灾害损失评估方法研究[J].中国农业科学,2004,37(2):201-207.

[9] 王 越,江志红,张 强,等.用 Palmer 湿润指数作西北地区东部冬小麦旱涝评估[J].应用气象学报,2008,19(3):342-349.

[10] 李美荣,李星敏,李艳莉,等.基于连阴雨灾害指数的陕西省苹果生长风险分析[J].干旱气象,2011,29(1):106-109.

[11] 吴哲红,詹沛刚,陈贞宏,等.3 种干旱指数对贵州省安顺市历史罕见干旱的评估分析[J].干旱气象,2012,30(3):315-322.

[12] 廖要明,张 强,陈德亮.中国天气发生器的降水模拟[J].地理学报,2004,59(5):698-703.

[13] 王 斌,付 强,王 敏,等.几种模拟逐日降水的分布函数比较分析[J].数学的实践与认识,2011,41(9):128-133.

[14] 杨金华,付 强,王 斌,等.基于降水随机模拟的作物受旱概率率分析[J].水利科技与经济,2012,18(11):75-77.

[15] 王 斌,付 强,王忠波,等.基于降水随机模拟的旱作区农业旱情等级划分方法[J].中国农村水利水电,2011,(3):167-170.

[16] 王 斌,付 强,张金萍,等.逐日降水的随机模拟模型及其在黑龙江省的应用[J].农机化研究,2011,33(9):65-69.

[17] Geng F, Penning de Vries F W T, Supit I. A simple method for generating daily rainfall data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986,36:363-376.

[18] Lee Teang Shui, Aminul Haque. Stochastic rainfall model for irrigation projects[J]. Pertanika J Sci & Technol, 2004,12(1):137-147.

[19] 刘永和,张万昌,朱时良,等.基于广义线性模型和 NCEP 资料的降水随机发生器[J].大气科学,2010,34(3):599-610.

[20] 谭宏伟,周柳强,谢如林,等.蔗区降雨分布与甘蔗需水及加肥灌溉效应[J].西南农业学报,2008,21(5):1381-1384.

[21] 干旱评估标准(试行)[S].北京:国家防汛抗旱总指挥部,2006.

(上接第 265 页)

[10] Madejon E, Mora A P, Felipe E, et al. Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation[J]. Environ Poll, 2006,139:40-52.

[11] 胡振琪.土地复垦与生态重建[M].北京:中国矿业大学出版社,2008.

[12] 张 锂,韩国才,陈 慧,等.黄土高原煤矿区煤矸石中重金属对土壤污染的研究[J].煤炭学报,2008,33(10):1141-1146.

[13] 李海霞,胡振琪,李 宁,等.淮南某废弃矿区污染场的土壤重金属污染风险评价[J].煤炭学报,2008,33(4):423-426.

[14] 王 莹,董霁红.徐州矿区充填复垦地重金属污染的潜在生态风险评价[J].煤炭学报,2009,34(5):650-655.

[15] 董霁红,于 敏,程 伟,等.矿区复垦土壤种植小麦的重金属安全性[J].农业工程学报,2010,26(12):280-286.

[16] 马成玲,周健民,王火焰,等.农田土壤重金属污染评价方法研究—以长江三角洲典型县级市常熟市为例[J].生态与农村环境学报,2006,22(1):48-53.

[17] 雷 鸣,曾 敏,郑袁明,等.湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J].环境科学学报,2008,28(6):1212-1220.