

Soil Environmental Quality Assessment in Changle, Shandong

Hongkui Li, Guodong Chen, Daicheng Han, Na Cai

Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization, The Ministry of Land and Resources, Shandong Key Laboratory of Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Shandong Geological Sciences Institute, Jinan Shandong
Email: lhklhk126@126.com

Received: Sep. 21st, 2015; accepted: Oct. 8th, 2015; published: Oct. 15th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In Changle County, we collected 315 topsoil samples, analyzed the content of As, Pb, Zn, Cd, Cr, Cu, Hg and Ni eight kinds of heavy metals, using single factor index and Nemerow index to evaluate the soil environmental quality. The evaluation results of single factor soil environmental quality showed that the overall condition of soil environmental quality in Changle County is good; except nickel, seven other heavy metals indicators are clean, i.e. soil area that reached grade I soil environmental quality standards accounted for more than 99.46%. The high-risk nickel content of soil environment is primarily related to geological background. Contaminated areas are concentrated in Neogene basalts distribution areas in central part of Changle County. Its lithology is mainly basalt with interlayer of conglomerate, claystone and diatomite. Nemerow pollution index evaluation shows that the quality of soil environment in Changle County is mainly grade I level of soil environmental quality standards, with ratio of 53.83%. Then grades II and III account for 22.62% and 19.04% of the domain area. Again grades IV and V account for 3.91% and 0.60 % of the domain area. Nickel content is relatively high, which is the most polluted factor affecting the Nemerow index evaluation results. The remaining seven indicators of heavy metals are clean.

Keywords

Changle, Shandong Province, Soil, Heavy Metal, Environmental Quality Evaluation

山东昌乐土壤环境质量评价

李洪奎, 陈国栋, 韩代成, 蔡娜

山东省地质科学研究所, 国土资源部金矿成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南

Email: lhklhk126@126.com

收稿日期: 2015年9月21日; 录用日期: 2015年10月8日; 发布日期: 2015年10月15日

摘要

在昌乐县采集了315份表层土壤样品, 分析了其中As、Pb、Zn、Cd、Cr、Cu、Hg和Ni八种重金属元素的含量, 采用单因子指数和内梅罗指数对土壤环境质量进行评价。单因子土壤环境质量评价结果表明, 昌乐县土地环境质量总体状况良好, 除镍元素以外, 其它七项重金属指标均属清洁的, 即达到I级土壤环境质量的土壤面积都占99.46%以上。土壤环境中镍的高风险含量, 主要与地质背景有关, 污染区集中分布在昌乐县中部的新近纪玄武岩分布区, 岩性主要为玄武岩夹砂砾岩、粘土岩及硅藻土。内梅罗污染综合指数评价结果表明, 昌乐县土地环境质量以I级土壤环境质量的土壤为主, 比例为53.83%, 其次为II级、III级, 分别占境域面积的22.62%、19.04%, IV级、V级土次之, 分别占境域面积的3.91%、0.60%。其中, 镍含量较高, 属于污染最严重的因子, 对内梅罗综合指数评价结果影响较突出, 而其余七项重金属指标均属清洁的。

关键词

山东昌乐, 土壤, 重金属, 环境质量评价

1. 引言

土壤环境质量主要受自然环境和人为环境双重因素控制。自然环境指各种自然条件和自然资源的总和, 如地质、地貌、气候、水文、生物等。人工环境指人类在自然环境的基础上, 为了不断提高物质和精神生活水平通过长期有计划、有目的的经济活动和社会活动, 逐步建立起来的生存环境。长期的人类活动在改造自然环境的同时, 也对环境质量造成一定的负面影响, 如大量使用化肥、农药和生产生活废弃物排放会导致土壤受到一定的污染等。目前, 土壤污染已成为抑制农业可持续发展一个重要因素, 已引起各级政府的高度重视和农业、环境、地质、社会等学者的广泛关注[1]-[4]。

以昌乐县生态地球化学调查取得的区域性土壤元素分析测试资料为依据, 参照国家土壤环境质量标准及区域土壤元素背景值, 评价土壤环境质量现状及其污染程度, 进行变化趋势研究与预测, 将为区域农业生产和发展规划、农村产业结构调整、土壤施肥与改良、合理种植布局、发展无公害、绿色食品, 以及农业生态环境保护、土地利用规划、污染治理与修复提供科学依据。

2. 工作方法

2.1. 样品采集

表层土壤样品采用网格布样法采集, 采样密度为1个点/ km^2 , 采样深度为0~20 cm。土壤采样点分布均匀, 表层土壤每个采样小格中都进行了布点, 除个别点外采样点位均布置在格子中部。

样品编号以1:5万图幅为单元连续编号, 表层土壤以4 km^2 为单位格子, 按偶数方里网为界(2 km \times 2 km)将单位格子编号, 编号顺序自上而下、自左向右。在每个单位格子中划分为4个小格(1 km^2), 标号顺序自左向右自上而下为A、B、C、D。格子编号前先做样品编号表, 每50个号码为一批。其中随即取1

个号码为重复采样大格编号，并在表上注明。另随即取 4 个号码为标准控制样分析编号。样品编号时做到重复样和标准控制样在同一批次内基本均匀分布。取样采用 GPS 精确定位，同时结合地形图定点，全县共布设 315 个采样点(图 1)。采样点布置在农田、菜地、林(果)地、草地等。实地采集时主要选择单元样格内的主要土壤类型，尽最大可能保持每一组合样内的 4 个单点样土壤类型一致，避开可能存在污染的土壤和人为搬运的堆积土。为增加土壤样品的代表性，采用一点多坑法采样，每个样点在直径 10 m 范围内选择 3~5 个 0~20 cm 耕层土壤混合，按四分法取分析样品原始质量均大于 1000 g [5]。在山前冲积地区采集时，选择覆盖层较厚的地段采样，城镇区样品采集时适当加深取样深度，以保证采样符合有关技术规范要求。

2.2. 测试元素与指标

根据《全国土壤污染状况评价技术规定》，同时依据相关国家标准和行业标准，选取影响农产品品质的主要农田污染物含量作为土壤环境质量评价指标。本次工作选取了 PH、Cd、Hg、Cu、As、Pb、Cr、Zn、Ni 等评价指标来对昌乐县土壤环境质量进行评价。

表层土壤样品测试分析指标(元素)共计 Ag、As、Au、B、Ba、Be、Bi、Br、C、Cd、Ce、Cl、Co、Cr、Cu、F、Ga、Ge、Hg、I、La、Li、Mn、Mo、N、Nb、Ni、P、Pb、Rb、S、Sb、Sc、Se、Sn、Sr、Th、Ti、Tl、U、V、W、Y、Zn、Zr、K₂O、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、OrgC、PH 等 54 项。土壤样品测试分析由武汉综合岩矿测试中心完成。采用的分析方法主要有等离子体发射光谱法、X 射线荧光光谱法、原子荧光光谱法、离子选择性电极法等[6]。

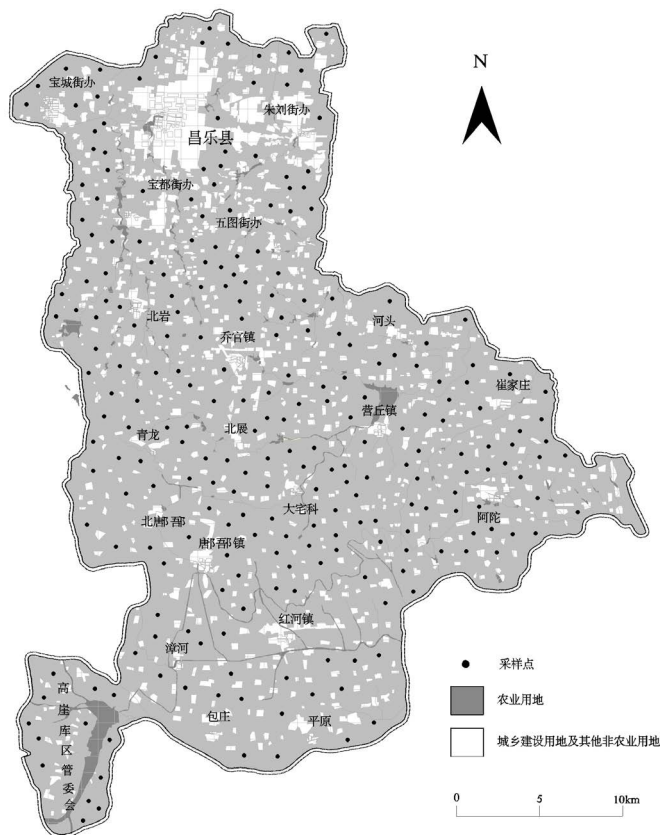


Figure 1. Distribution chart of samples sites on Changle topsoil

图 1. 昌乐表层土壤采样点分布图

采用了标准样、密码样、监控样等多种监控手段,保证了分析质量的可靠性。分析方法的准确度和精密度是用分析国家一级标准物质(GBW)的方法进行检验。配套方案是经过12次分析国家一级标准物质(GSS-1~GSS-8)系列样品,分别统计各被测项目平均值与标准值之间的对数差($\Delta \lg C$)和相对标准偏差RSD(精密度)。实验室分析方法的精密度和准确度均符合规范要求。

3. 土壤环境质量评价

3.1. 评价标准

土壤环境质量评价是在昌乐县表层土壤地球化学调查成果基础上进行,以II类土壤环境污染质量标准为依据,采用PH、Cd、Hg、Cu、As、Pb、Cr、Zn、Ni等评价指标。各指标的生态功能见表1[7]。

其评价标准是以中华人民共和国国家标准(GB15618-1995)《土壤环境质量标准》为评价标准(表2)[8]。

(1) 土壤环境质量分级[9]

Table 1. Multi-objective investigation element classification list

表 1. 多目标调查元素分类一览表

元素分类		元素种类(分析)	元素种类(未分析)
生命元素	生命组成元素	C、N、Ca、P、K、S、Cl、Na、Mg、Si	H、O
	生命必需元素	Fe、Cu、Zn、Mn、Co、Mo、 Se、F、Cr、V、Ni、I、Br	
毒性元素	毒性元素	Cd、Ge、Sn、Sb、Hg、Pb、Ga、As、Li	Te、In
	潜在和放射毒性元素	Be、Tl、Th、U、Sr、Ba	Po、Ra
无毒性稳定元素		Ti、Zr、Sc、Y、Nb、Rb、Ag、Au	Hf、Ta、Ru、Os、 Ir、Pd、Pt
中间元素		B、Al	
其它		Bi、La、W、Ce、Ph、OrgC	

Table 2. Soil environmental quality standard value table (unit: 10^{-6})

表 2. 土壤环境质量标准值表(单位 10^{-6})

项目	一级	二级	三级			
土壤 pH 值	自然背景	<6.5	6.5~7.5	>7.5	>6.5	
镉	≤0.20	≤0.30	≤0.30	≤0.60	≤1.0	
汞	≤0.15	≤0.30	≤0.50	≤1.0	≤1.5	
砷	水田	≤15	≤30	≤25	≤20	≤30
	旱地	≤15	≤40	≤30	≤25	≤40
铜	农田等	≤35	≤50	≤100	≤100	≤400
	果园	—	≤150	≤200	≤200	≤400
铅	≤35	≤250	≤300	≤350	≤500	
铬	水田	≤90	≤250	≤300	≤350	≤400
	旱地	≤90	≤150	≤200	≤250	≤300
锌	≤100	≤200	≤250	≤300	≤500	
镍	≤40	≤40	≤50	≤60	≤200	
六六六	≤0.05		≤0.5		≤1.0	
滴滴涕	≤0.05		≤0.5		≤1.0	

注: ① 重金属(铬主要是三价)和砷均按元素量计,适用于阳离子交换量 $>5 \text{ cmol (+)}/\text{kg}$, 若 $\leq 5 \text{ cmol (+)}/\text{kg}$, 其标准值为表内数值的半数。

② 六六六为四种异构体总量,滴滴涕为四种衍生物总量。③ 水旱轮作地的土壤环境质量标准,砷采用水田值,铬采用旱地值。

根据土壤应用和保护目标, 将土壤环境质量功能划分为 I~III 类:

I 类土壤主要适用于国家规定的自然保护区(原有背景重金属含量高的除外)、集中式生活饮用水源地、茶园、牧场和其他保护地区的土壤, 土壤质量基本上保持自然背景水平。

II 类土壤主要适用于一般农田、蔬菜地、茶园、果园、牧场等土壤, 土壤质量基本上对植物和环境不造成危害和污染。

III 类土壤主要适用于林地土壤及污染物容量较大的高背景值土壤和矿产附近等地的农田土壤(蔬菜地除外)。土壤质量基本上对植物和环境不造成危害和污染。

(2) 标准分级及土壤环境质量执行标准的级别规定[9]

I 类土壤环境污染质量执行一级标准, 其标准是为保护区域自然生态, 维护自然背景值的土壤环境质量的限制值。

II 类土壤环境污染质量执行二级标准, 该标准是为保障农业生产, 维护人体健康的土壤限制值。

III 类土壤环境污染质量执行三级标准, 该标准是为保障农林业生产和植物正常生长的土壤临界值。

3.2. 评价方法

土壤环境质量评价以表层土壤地球化学数据为基础, 参照 GB15618-1995《土壤环境质量标准》, 根据土壤中 PH、Cd、Hg、Cu、As、Pb、Cr、Zn、Ni 等评价指标的实测资料, 确定单因子环境质量分级; 然后在单因子指数的基础上利用内梅罗综合指数法计算综合评价结果, 确定各评价单元土壤环境质量级别及其应用功能[10]-[12]。

单因子评价采用如下公式[13]:

$$p_i = \begin{cases} C_i/C1 & C_i \leq C1 \\ 1 + (C_i - C1)/(C2 - C1) & C1 < C_i \leq C2 \\ 2 + (C_i - C2)/(C3 - C2) & C2 < C_i \leq C3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_i 为第 i 中污染物的单因子指数; C_i 为第 i 中污染物的测定值; $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 分别为国家土壤环境质量标准的一级、二级和三级标准值。

综合土壤环境质量评价采用内梅罗综合指数法[13]:

$$P = \sqrt{\frac{(\overline{p_i})^2 + (p_{i\max})^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P 为环境质量综合评价指数; p_i 为第 i 中污染物的单因子指数; $p_{i\max}$ 为最严重污染物的单因子指数。

这种方法的计算结果不仅考虑各种污染物的平均污染水平, 也反映了污染最严重的污染物给环境造成的危害[14]。土壤环境质量评价分级标准见表 3 [5] [15]。

3.3. 数据处理

所有数据的统计分析采用 SPSS19.0 和 Excel2010 进行, 土壤环境质量各元素分级图的制作通过 ArcGIS9.2 完成。

4. 评价结果与分析

4.1. 评价结果综述

昌乐县表层土壤重金属元素单因子环境质量评价结果见表 4。

砷、镉、铬、铜、汞、镍、铅、锌等单因子土壤环境质量评价结果表明: 昌乐县土壤环境质量总体

Table 3. Classification standards of soil environmental quality
表 3. 土壤环境质量评价分级标准

等级划分	P	污染等级	污染水平
I	$P \leq 0.7$	安全	非污染, 清洁
II	$0.7 < P \leq 1$	警戒线	非污染, 尚清洁
III	$1 < P \leq 2$	轻污染	土壤轻污染, 作物已受污染
IV	$2 < P \leq 3$	中度污染	土壤、作物均受中度污染
V	$P > 3$	重度污染	土壤、作物均受重度污染

Table 4. Changle County topsoil Environmental Quality Assessment Tables of single factor
表 4. 昌乐县表层土壤环境质量单因子评价统计表

分级	I	II	III	IV	V	
定义	清洁	尚清洁	轻度污染	中度污染	重度污染	
指数范围	<0.7	0.7~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	>3.0	
As	面积(km ²)	1094.94				
	比例(%)	100				
Cd	面积(km ²)	1091.99	2.96			
	比例(%)	99.73	0.27			
Cr	面积(km ²)	1090.32	4.62			
	比例(%)	99.58	0.42			
Cu	面积(km ²)	1089.34	5.62			
	比例(%)	99.49	0.51			
Hg	面积(km ²)	1089.06	1.32	2.53	1.21	0.83
	比例(%)	99.46	0.12	0.23	0.11	0.08
Ni	面积(km ²)	681.75	179.11	193.06	39.08	1.96
	比例(%)	62.26	16.36	17.63	3.57	0.18
Pb	面积(km ²)	1094.94				
	比例(%)	100				
Zn	面积(km ²)	1094.94				
	比例(%)	100				
综合指数	面积(km ²)	589.39	247.63	208.5	42.81	6.6
	比例(%)	53.83	22.62	19.04	3.91	0.6

状况良好, 除镍元素外, 其他 7 项重金属指标均属清洁的, 即达到 I 级土壤环境质量的土壤面积占 99.46% 以上。其中, 砷、铅、锌达到 I 级土壤环境质量的土壤面积达 100%。镍以 I 级土壤环境质量的土壤为主, 比例为 62.26%, 其次为 II 级、III 级, 分别占域境面积的 16.36% 和 17.63%。昌乐县土壤环境中镍的高风险含量, 主要与地质背景有关, 污染区集中分布在昌乐县中部的新近纪玄武岩分布区, 岩性主要为玄武岩夹砂砾岩、黏土岩及硅藻土[16]。

综上所述, 昌乐县境内土壤环境质量总体状况良好, 达到 I 级土壤环境质量的土地占 53.83%, II 级土壤

环境质量的土地占 22.62%，III 级土壤环境质量的土地占 19.04%，完全能满足农业耕作土壤的环境质量要求。

4.2. 土壤环境功能类型单因子区域分布特征

(1) 砷(As)、铅(Pb)、锌(Zn)

昌乐县表层土壤中砷、铅、锌元素含量普遍较低，其单项污染物指数最大值均小于 0.7，全区土壤均达到 I 级土壤环境质量标准。昌乐县单项污染物指数特征参数见表 5。

(2) 镉(Cd)

昌乐县表层土壤中镉元素含量普遍较低，其单项污染物指数最大值仅为 1.23，全区土壤达到 I 级土壤环境质量的占 99.73%，II 级土壤占 0.27%，仅局部分布在高崖库区东部，见图 2。

(3) 铬(Cr)

昌乐县表层土壤中铬元素含量普遍较低，其单项污染物指数最大值仅为 0.92，全区土壤达到 I 级土壤环境质量的占 99.58%，II 级土壤占 0.42%，仅零星分布在青龙 - 北展南部一带，见图 3。

Table 5. Changle County topsoil single pollutant index characteristic parameter table

表 5. 昌乐县表层土壤单项污染物指数特征参数表

特征参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	pH
最大值	0.53	1.23	0.92	1.04	4.98	4.06	0.53	0.47	8.64
平均值	0.25	0.31	0.27	0.28	0.07	0.78	0.07	0.23	7.30

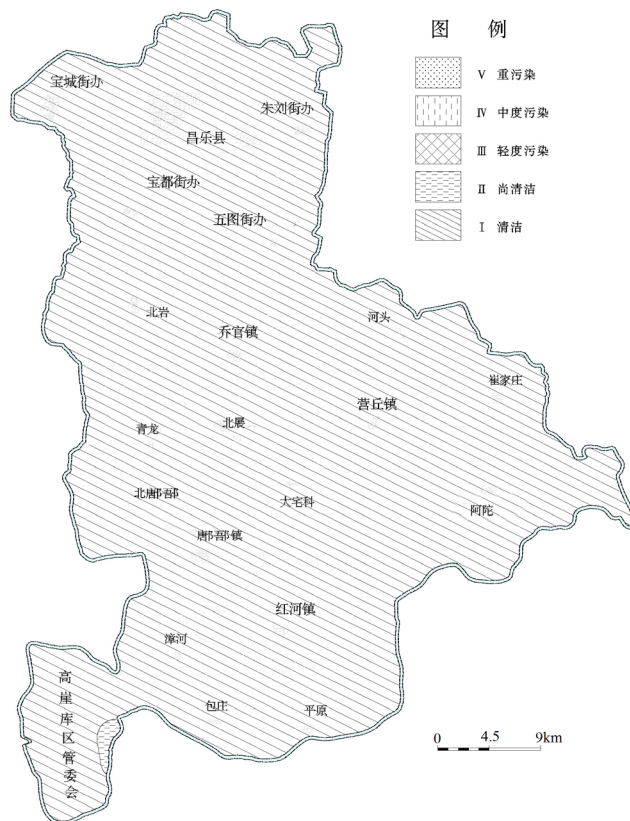


Figure 2. Changle topsoil cadmium (Cd) elements of Environmental Quality Grading Chart

图 2. 昌乐表层土壤镉(Cd)元素环境质量分级图

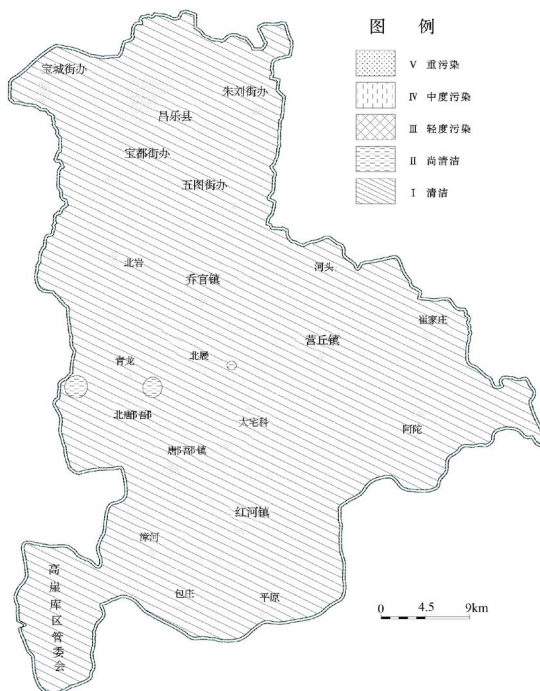


Figure 3. Changle topsoil chrome (Cr) elements of Environmental Quality Grading Chart

图 3. 昌乐表层土壤铬(Cr)元素环境质量分级图

(4) 铜(Cu)

昌乐县表层土壤中铜元素含量普遍较低，其单项污染物指数最大值仅为 1.04，全区土壤达到 I 级土壤环境质量的占 99.49%，II 级土壤占 0.51%，仅零星分布在北郎部 - 北展部一带，见图 4。

(5) 汞(Hg)

昌乐县表层土壤中汞元素含量普遍较低，其单项污染物指数最大值仅为 4.98，均值为 0.07，全区土壤达到 I 级土壤环境质量的占 99.46%，零星分布有 II~V 级土壤。其中，II 级土壤占 0.12%，III 级土壤占 0.23%，IV 级土壤占 0.11%，V 级土壤占 0.08%，仅分布在青龙西部，见图 5。

(6) 镍(Ni)

昌乐县表层土壤中镍元素含量较高，主要与地质背景有关，昌乐县中部为大面积的新近纪玄武岩分布区，岩性主要为玄武岩夹砂砾岩、黏土岩及硅藻土。其单项污染物指数最大值为 4.06，均值为 0.78，全区土壤达到 I 级土壤环境质量的占 62.26%，其次为 II 级、III 级，分别占境域面积的 16.36%、17.63%，IV 级、V 级土壤为零星分布，分别占境域面积的 3.57%、0.18%。I 级土壤主要分布在昌乐县北部和东南部，II 级土壤主要分布在宝城街道、城南街道、五图街道、高崖库区以及北郎部 - 北展、大宅科 - 平原一带，III~V 级土壤与新近纪玄武岩分布区一致，主要分布在青龙、北岩、北展、乔官镇和五图街道等地，见图 6。

(7) 内梅罗综合指数

内梅罗指数是一种兼顾极值或称突出最大值的计权型多因子环境质量指数。该指数反映了各污染物对土壤的作用，同时突出了高浓度污染物对土壤环境质量的影响。内梅罗指数特别考虑了污染最严重的因子，内梅罗环境质量指数在加权过程中避免了权系数中主观因素的影响，是目前仍然应用较多的一种环境质量指数[17] [18]。

根据上述 8 项环境质量指标的单项污染指数，可以计算得到表征综合环境质量的内梅罗指数，根据内梅罗污染综合指数，可将昌乐县土壤环境质量划为 5 个级别，见表 4、图 7。

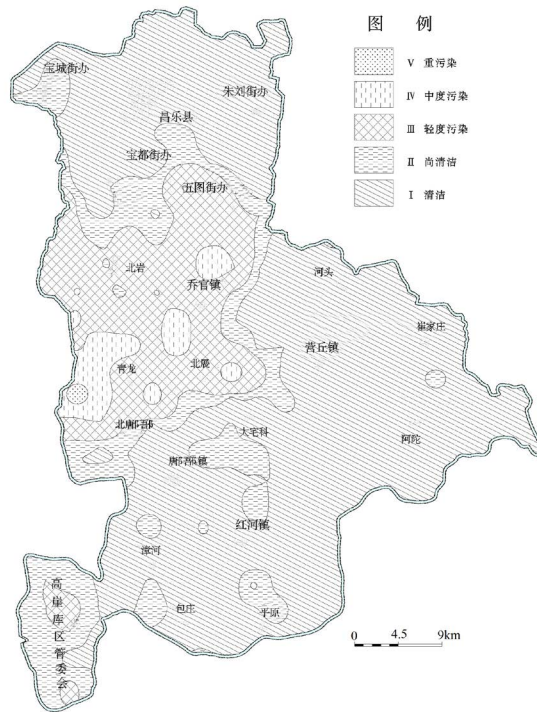


Figure 6. Change topsoil mercury (Hg) elements of Environmental Quality Grading Chart
图 6. 昌乐表层土壤汞(Hg)元素环境质量分级图

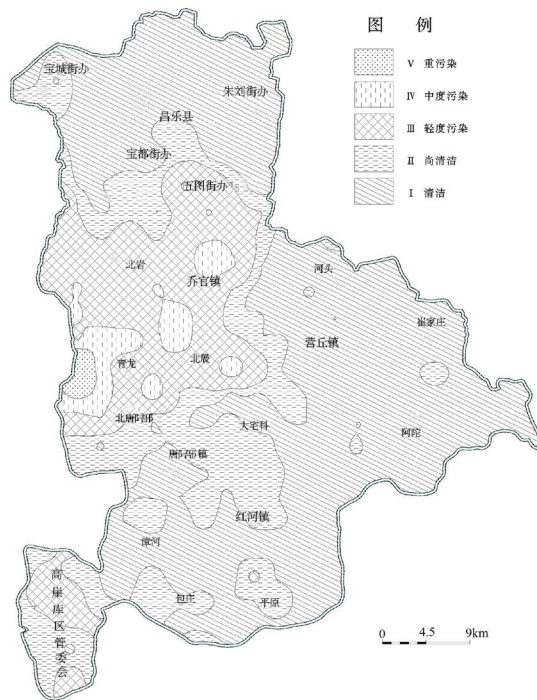


Figure 7. Change topsoil Environmental Quality Grading Chart (Nemerow index)
图 7. 昌乐表层土壤环境质量分级图(内梅罗综合指数)

内梅罗污染综合指数评价结果表明：昌乐县土地环境质量总体状况良好，以 I 级土壤环境质量的土壤为主，比例为 53.83%，其次为 II 级、III 级，分别占境域面积的 22.62%、19.04%，IV 级、V 级土次之，分别占境域面积的 3.91%、0.60%。其中，砷、镉、铬、铜、汞、铅、锌七项重金属指标均属清洁的，达到 I 级土壤环境质量的土壤面积都在 99.46% 以上；镍含量较高，属于污染最严重的因子，对内梅罗综合指数评价结果影响较突出，因而镍的单项污染物评价结果与内梅罗综合指数评价结果基本一致，即各级土壤的面积、比例和分布特征具有相似的规律。

5. 结论

对昌乐县表层土壤进行区域布点采样，共采集表层土壤样本 315 份，对土壤中重金属元素 As、Pb、Zn、Cd、Cr、Cu、Hg 和 Ni 进行了分析，同时采用单因子指数和内梅罗指数对土壤环境质量进行评价，得出评价结果，即昌乐县土地环境质量总体状况良好，除镍元素以外，其它 7 项重金属指标均属清洁的，即达到 I 级土壤环境质量的土壤面积都占 99.46% 以上。土壤环境中镍的高风险含量，主要与地质背景有关，污染区集中分布在昌乐县中部的新近纪玄武岩分布区，岩性主要为玄武岩夹砂砾岩、粘土岩及硅藻土。内梅罗污染综合指数评价结果表明，昌乐县土地环境质量以 I 级土壤环境质量的土壤为主，比例为 53.83%，其次为 II 级、III 级，分别占境域面积的 22.62%、19.04%，IV 级、V 级土次之，分别占境域面积的 3.91%、0.60%。其中，镍含量较高，属于污染最严重的因子，对内梅罗综合指数评价结果影响较突出，而其余 7 项重金属指标均属清洁的。

参考文献 (References)

- [1] Appleton, J.D. and Ridgway, J. (1993) Regional geochemical mapping in developing countries and its application to environmental studies. *Applied Geochemistry*, **8**, 103-110. [http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(09\)80019-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(09)80019-X)
- [2] Goovaerts, P. (1999) Geostatistics in soil science: State of the art and perspectives. *Geoderma*, **89**, 1-45. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00078-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0)
- [3] McLaughlin, M.J., Parker, D.R. and Clarke, J.M. (1999) Metals and micronutrients—Food issues. *Field Crop Research*, **60**, 143-163. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00137-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00137-3)
- [4] Yang, Q.W., Shu, W.S., Qiu, J.W., et al. (2004) Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around lechang Lead/Zinc Mine, Guangdong, China. *Environment International*, **30**, 883-889. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.002>
- [5] 韩平, 王纪华, 陆安祥, 等 (2012) 北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价. *农业环境科学学报*, **1**, 106-112.
- [6] 阎鹏, 徐世良, 曲克健, 等 (1994) 山东土壤. 中国农业出版社, 北京, 231-232.
- [7] 陈怀满, 郑春蓉, 周东美, 等 (2006) 土壤环境质量研究回顾与讨论. *农业环境科学学报*, **4**, 821-827.
- [8] 高怀友, 赵玉杰, 师荣光, 等 (2005) 区域土壤环境质量评价基准研究. *农业环境科学学报*, **24(增刊)**, 342-345.
- [9] 周国华, 秦绪文, 董岩翔, 等 (2005) 土壤环境质量的制定原则与方法. *地质通报*, **8**, 721-727.
- [10] 杜艳, 常江, 徐笠 (2010) 土壤环境质量评价方法研究进展. *土壤通报*, **3**, 749-756.
- [11] 代杰瑞, 崔元俊, 庞绪贵, 等 (2011) 山东省东部地区农业生态地球化学调查与评价. *山东国土资源*, **5**, 1-7.
- [12] 代杰瑞, 庞绪贵, 宫玉鑫, 等 (2010) 山东威海农业生态地球化学调查与评价. *地质通报*, **9**, 1391-1398.
- [13] 李祚冰, 丁晶, 彭荔红 (2004) 环境质量评价原理与方法. 化学工业出版社, 北京, 53-65.
- [14] 林成谷 (1996) 土壤污染与防治. 中国农业出版社, 北京, 127-136.
- [15] 李雪梅, 邓小文, 王祖伟, 等 (2010) 污染因子权重及区域环境质量综合评价分级标准的确定. *干旱区资源与环境*, **4**, 97-100.
- [16] 李洪奎, 钟杰, 亓朝晖, 等 (2014) 昌乐县地质矿产资源开发利用研究. 地质出版社, 北京, 296-351.
- [17] 关卉, 万洪富, 王洗民, 等 (2006) 雷州半岛土壤重金属分析特征及其污染评价. *环境污染与防治*, **10**, 757-760, 771.
- [18] 李波, 林玉锁, 张孝飞, 等 (2005) 宁连高速公路两侧土壤和农产品中重金属污染的研究. *农业环境科学学报*, **2**, 266-269.