皖江经济区基本农田地球化学特征及成因

王茜，张光辉，田言亮，严明疆，张希雨
中国地质科学院水文地质环境地质研究所，河北石家庄，050061

内容提要：皖江经济区的基本农田分布区是我国国家商品粮生产基地，该区基本农田的土地地球化学特征与粮食质量安全密切相关。本文以皖江经济区的南陵—泾县国家商品粮基地为重点研究区，以野外实地调查资料和采集的 0～20cm 深度土壤样的化学组分检测分析数据作为研究基础，应用地学数理统计学方法和 GIS 空间特征分析技术，通过该农田区土壤元素组成、含量、空间分布和异常变化特征及其成因研究，发现：南陵—泾县基本农田的土壤中重金属 Fe、Mn 和 Hg 等含量存在异常，Fe、Mn 变异系数呈现区域性异常，Hg 含量表现为局部异常；Ca、Mg 和 Na 元素呈现显著空间分布相关性，与成土母质影响相关。在区域分布上，南陵—泾县基本农田区土壤中重金属元素和盐分含量呈现南高、北低的趋势性分布特征，这与当地水文地质条件、地下水水位埋藏状况和矿化度之间存在一定的相关性。从南陵—泾县基本农田区土地地球化学分布特征来看，南部地区不利于高品质稻谷、小麦等粮食生产。

关键词：商品粮基地；地球化学；基本农田；重金属；土壤盐分

近年来，我国粮食及各类农产品安全问题不断凸显，并受到政府及相关部门和学者的关注（Chen Huaiman et al.，2004；Wu Chunhua et al.，2004；Zhu Yinmei et al.，1999）。基本农田土壤地球化学状况是粮食质量安全与否的重要基础，土壤作为物质与能量的载体，成为各类物质及能量在生态系统不同圈层间迁移、转化的重要环节，也是污染物质聚集的地球化学汇（Xu Jialin，1995）。土壤中元素与其化合物的种类，形态和含量的高低在一定程度上决定着土地质量的优劣。在区域、流域尺度，地质地球化学背景和地质地球化学作用过程是土壤元素形态变化和分布分配的主导因素（Fergusson J E et al.，1990；Yang Zhongfang et al.，2005）。因此，阐明国家商品粮基地基本农田区土壤元素分布及其异常特征和成因，具有重要现实研究意义。

皖江经济区基本农田分布区是我国水稻、小麦、玉米、薯类等粮食作物重要产区和国家商品粮生产基地。近年来随着耕地面积不断减少，土壤污染问题日趋突出。有关皖江地区土壤地球化学研究，主要集中在元素地球化学基准值、背景值的确定（Chen Guoguang et al.，2008；Chen Xingren et al.，2012a；Zhu Lixin et al.，2006），土壤中微量元素和矿物组成分析（Chen Xingren et al.，2012b；Wei Hualing et al.，2013；Zhou Jun et al.，2001），重金属分布特征与来源判定（Li Xiangling et al.，2015；Shan Ping et al.，2015）等方面。对于基本农田土壤元素异常特征及成因研究成果较为少见。本文以皖江经济区的南陵—泾县国家商品粮基地为重点研究区，以野外实地调查和 0～20cm 土壤深度样品采集获取的海量数据作为研究基础，应用地学数理统计学方法和 GIS 空间特征分析技术，侧重商品粮基地基本农田土壤元素含量组成、空间分布与变化特征及成因研究。

1 研究区概况

皖江地区位于长江流域安徽段两岸，主要包括安徽沿江平原及巢湖地区，覆盖地域涉及现行行政区划的沿江 8 市，即：安庆、池州、铜陵、芜湖、马鞍山、巢湖、宣城（除绩溪县）和滁州市东部。研究区位于淮河－皖江经济区东南芜湖市南陵县—泾县（图 1），地理坐标：东经 117°58′～118°40′；北纬 30°22′～31°11′。总面积约 840km^2，人口约 76 万。研究区

注：本文为国家自然科学基金项目（项目编号 41502253）、地质调查项目“安徽南陵－泾县地区重要商品粮基地水文地质调查”（编号 12120115049701）、“淮河皖江经济区土地质量地球化学调查”（编号 12120123600016009）共同资助的成果。
收稿日期：2016-05-20；改回日期：2016-06-13；责任编辑：黄敏。
作者简介：王茜，女，1987 年生，河北石家庄人，博士研究生，地质工程专业。Email：wangqian870731@gmail.com。通讯作者：张光辉，男，1959 年生，辽宁沈阳人，研究员，博导，长期从事区域水循环演化和地下水可持续利用研究。Email：huanjing59@163.com。

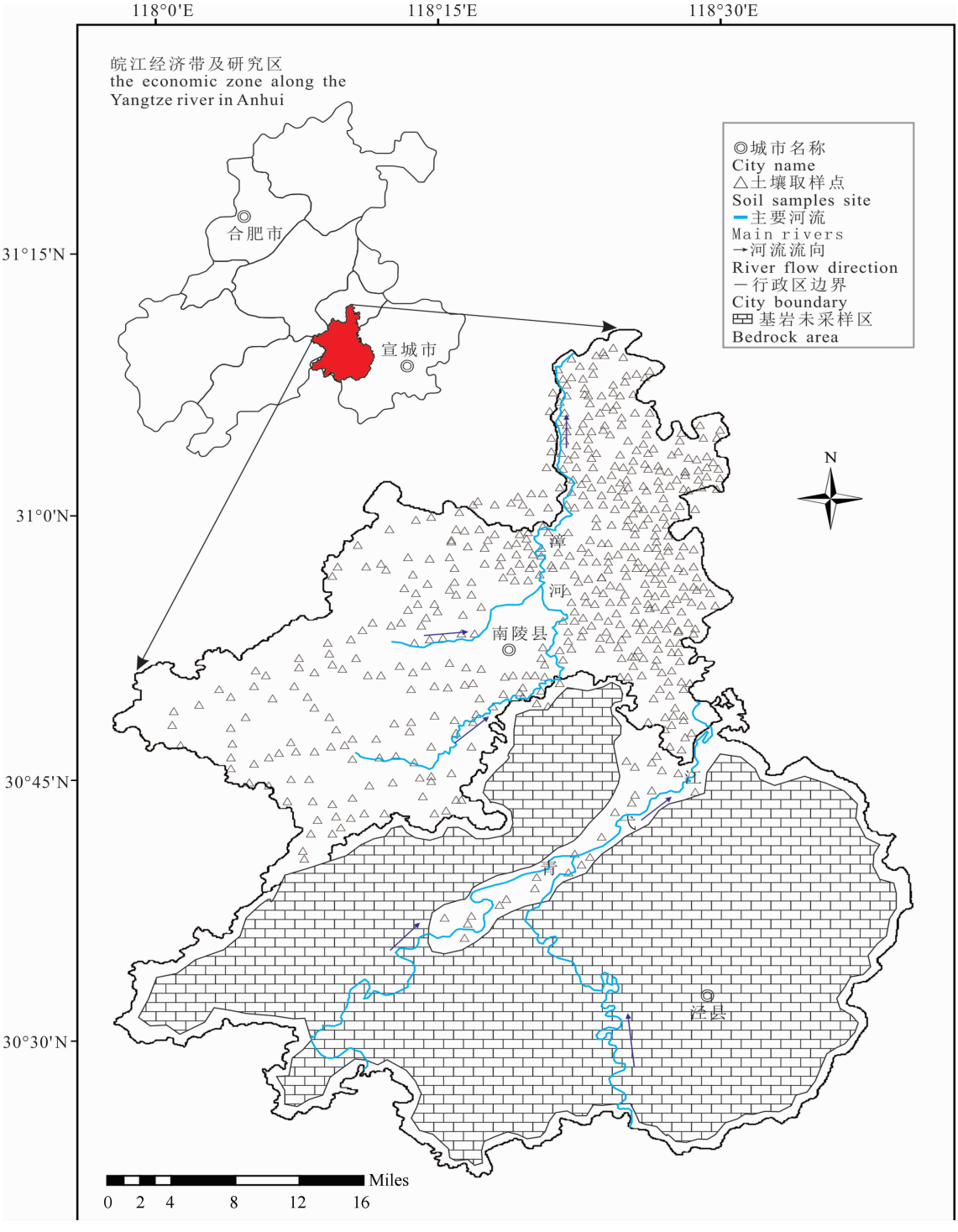

图 1　皖江经济区南陵－泾县基本农田采样分布图

Fig. 1　Location and sampling sites in Nanling-Jing county farmland of the economic zone along the Yangtze river in Anhui

地处皖南山区与沿江平原的过渡地带,地势呈西南部高东北部低,地貌以低山、丘陵、台地和平原组合为主。多年平均气温 15.8℃,年均降水量 1500mm,主要降水集中于 4～8 月,属于北亚热带湿润季风气候。境内主要河流为青弋江、漳河,土壤类型以水稻土为主,作物种植结构为双季水稻或稻麦轮作。

2　样品采集与分析方法

2015 年 7～11 月期间,项目组在研究区深入开展了区域水文地质、水文地球化学、地下水位埋藏状况、农作物播种和化肥农药施用状况及污染源等调查,按照农田区土地质量地球化学调查规范采集土

壤样品和测试分析了影响基本农田土地质量的化学组分和有益有害元素含量，采样点密度 1 点/2km^2，采样深度 0～20cm，采集样品 541 组(点)。样品采集点的布设为梅花模式，确保土壤样品分布均匀和代表性，客观反映采样单元的土壤化学组分和有益有害元素分布特征。每个土壤样品点的四周等间距(1.0m)处，各设置辅助样品点(4个)。将所有采样点的采集土壤样品，去除表层土、充分均匀后，装入塑料袋密封保存，样品重量＞1.0kg。采样的同时，利用 GPS 进行采样点位置定位，记录坐标和高程。

土壤样品经风干、研磨和剔除动植物残体、砾石和较大杂质后，按照测试规范的技术要求，分别过 2mm/0.074mm 土样筛待测。土壤样品测试分析，由国土资源部保定矿产资源监督检测中心完成，它具有中国地质调查局和国家主管部门颁发的相关资质。主要测试指标，包括：K、Na、Ca、Mg 等阳离子，HCO_3^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}、Cl^- 等阴离子，以及 Fe、Mn、As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 等元素，共计 37 项测试指标，如表 1 所示。

表 1 南陵—泾县土壤样品测试项目和方法标准

Table 1 Elements and methods of the soil samples analysis in Nanling-Jing county farmland

测试项目	分析方法标准	测试分析仪器
SO_4^{2-}	LY/T1251-1999	玻璃量器
Cl^-	LY/T1251-1999	玻璃量器
HCO_3^-	LY/T1251-1999	玻璃量器
Ca	LY/T1251-1999	电感耦合等离子光谱仪
Mg	LY/T1251-1999	电感耦合等离子光谱仪
K	LY/T1251-1999	电感耦合等离子光谱仪
Na	LY/T1251-1999	电感耦合等离子光谱仪
Fe	DD2005-01	电感耦合等离子光谱仪
Mn	DD2005-01	电感耦合等离子质谱仪
Zn	DD2005-01	电感耦合等离子质谱仪
Cu	DD2005-01	电感耦合等离子质谱仪
Pb	DD2005-01	电感耦合等离子质谱仪
Cr	DD2005-01	电感耦合等离子质谱仪
Cd	DD2005-01	电感耦合等离子质谱仪
As	DD2005-01	原子荧光光谱仪
Hg	DD2005-01	原子荧光光谱仪
B	DD2005-01	发射光谱仪
Mo	DD2005-01	电感耦合等离子质谱仪
Se	DD2005-01	原子荧光光谱仪
F	DD2005-01	离子计
全盐量	LY/T1251-1999	电子天平

3 农田区土地地球化学特征

3.1 土壤元素分布基本特征

为了更有针对性地探讨基本农田区土地地球化学特征及其对粮食生产安全影响，本研究将土壤中元素分为三类，分别进行分布基本特征分析。即土壤中大量存在的盐分离子、对作物生理生态和产量具有促进效用的微量元素和对农作物果实品质或人类健康产生危害的重金属元素。

基于在研究区采集的 541 组土壤样品的测试数据分析，南陵—泾县基本农田区的表层(0～20cm)土壤中 SO_4^{2-}、Cl^- 和 HCO_3^- 主要阴离子的平均含量分别为 43.25×10^{-6}、18.01×10^{-6} 和 37.43×10^{-6}，Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 和 Na^+ 阳离子的平均含量分别为 25.26×10^{-6}、4.33×10^{-6}、4.55×10^{-6} 和 10.00×10^{-6}。在基本农田区 0～20cm 表土中，土壤盐分以 SO_4^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、Ca^{2+} 和 Na^+ 为主，其含量占该层土壤化学组分总量的 93.79%，其中 SO_4^{2-}、HCO_3^- 和 Ca^{2+} 分别占 30.28%、26.21% 和 17.69%，Mg^{2+}、K^+ 仅分别占 3.03% 和 3.19%。在研究区表层的土壤中，SO_4^{2-} 含量占阴离子总量的 43.83%；Ca^{2+} 占阳离子总量的 57.23%。这表明南陵—泾县农田区土壤盐分以硫酸盐为主，呈弱酸性，与该区土壤平均 pH 6.08 结论监测结果相符。

Ca、Mg、K、Na 作为土壤中主要的盐基元素，其含量与组分对土壤环境的酸碱性质和养分情况具有显著影响(Pu Yulin et al., 2010)，其中 Ca、Mg、K 是植物生长发育所必需的大量元素(Huang Changyong, 2000; Wang Zhong, 2000)，Na 具有营养作用，也是植物生长发育所必需。大量研究已证实，Na 元素可以代替钾元素的部分功能被多数植物吸收利用(Marschner H, 1991)。在南陵—泾县农田区表层土壤中，平均含量的排序是 Ca＞Na＞K＞Mg，其中 Ca 和 Na 含量占总量的 80%，表现为 Mg、K 养分元素亏缺。

由表 2 可见，植物生长发育必需的微量元素 Fe、Mn、Zn、Cu、B 和 Mo 的平均含量分别为 31.57×10^{-3}、0.61×10^{-3}、69.06×10^{-6}、23.09×10^{-6}、61.42×10^{-6} 和 0.69×10^{-6}，相对江淮流域安徽地区土壤元素的现状背景值(Chen Xingren et al., 2012a)，除 Cu 含量低于该区土壤背景值之外，其余元素含量均高于该区背景值。相对全国土壤元素背景值(Wei Fusheng et al., 1991)，Zn 和 Mo 平均含量较低，Fe、Mn 等其余各元素含量较高，其中 Fe 含量显著偏高，是江淮流域土壤中 Fe 元素背景值的 7.1 倍，是全国土壤 Fe 元素背景值的 10.7 倍。此外，研究区土壤中 Cu、Zn 含量的最大值都显著高于安徽地区背景值，表明南陵—泾县农田区存在 Cu、

表 2　南陵—泾县基本农田表层土壤样品中元素分析结果

Table 2　The results of ions in the topsoil samples of the farmland area in Nanling-Jing county

元素	单位	最大值	最小值	平均值	标准差	CV(%)	江淮流域土壤背景值	全国土壤背景值
Fe	$\times10^{-3}$	49.20	17.05	31.57	5.78	18.31	4.44	2.94
Mn	$\times10^{-3}$	2.61	0.19	0.61	0.28	45.98	0.52	0.58
Zn	$\times10^{-6}$	134.80	32.90	69.06	20.23	29.29	53.20	74.20
Cu	$\times10^{-6}$	49.90	10.30	23.09	5.34	23.12	24.9	22.60
B	$\times10^{-6}$	92.90	17.70	61.42	12.52	20.38	57.70	47.80
Mo	$\times10^{-6}$	3.44	0.28	0.69	0.30	43.46	0.48	2.0
As	$\times10^{-6}$	195.00	3.15	12.38	12.47	100.76	9.40	11.20
Cd	$\times10^{-6}$	1.79	0.06	0.22	0.14	65.69	0.104	0.097
Cr	$\times10^{-6}$	88.60	27.80	62.42	9.48	15.18	69.40	61.0
Hg	$\times10^{-6}$	0.47	0.02	0.08	0.04	46.21	0.041	0.065
Pb	$\times10^{-6}$	61.50	18.20	30.07	5.73	19.05	25.90	26.0
Se	$\times10^{-6}$	0.11	6.10	0.31	0.32	105.65	0.23	0.29
F	$\times10^{-3}$	0.22	1.03	0.46	0.12	26.48	0.42	0.48

Zn 局部富集现状。

毒性金属以土壤作为赋存的介质,通过粮食—蔬菜等食物链的途径进入人体(Lei Ming et al., 2010; Chang Yuhu et al., 2015),严重威胁粮食安全和人类的健康。在南陵—泾县基本农田区土壤中,对农作物果实品质或人类健康产生危害的重金属元素 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的平均含量,分别为 12.38×10^{-6}、0.22×10^{-6}、62.42×10^{-6}、0.08×10^{-6}和 30.07×10^{-6},相对江淮流域和全国土壤中相应元素背景值,该农田区表层土壤中 As、Cd、Hg 和 Pb 含量较高,其中 Cd、Hg 的平均含量是江淮流域土壤中 Cd、Hg 背景值的 2 倍,对农作物安全生产不利。

3.2　土壤元素空间变异和聚类特征

这里采用"变异系数"(Coefficient of variation, CV)作为土壤元素含量空间分布变异分析的技术指标,表征一组不同元素之间离散程度,其数值为观测变量数据的标准差与平均值的百分比(Lei Zhidong et al., 1988; Wang Shuying et al., 2008)。根据 CV 值的大小,将土壤元素的变异程度划分为三种不同状况,即:当 CV 值小于 20%时,表征该元素的变异性"较弱";当 CV 值在 20%～100%之间时,表征该元素变异性"中等";当 CV 值大于 100%时,表征该元素的变异性"较强"(Dong Guotao et al., 2010; Wang Bingxi et al., 2008; Wang Shaoqiang et al., 2001)。

通过对南陵—泾县国家商品粮基地的农田区表层土壤中元素变异系数研究表明,土壤中元素存在不同程度的变异,其中 Fe、Pb 和 Cr 元素的 CV 值小于 20%,变异程度"较弱"。而 K、As 和 Se 元素的变异系数大于 100%,在空间分布上呈现"较强"变异特征。Ca、Mg、Mn 和 Zn 元素的 CV 值介于 20%～100%之间,变异程度"中等"。

在对土壤中各金属元素进行标准差和标准化处理基础上,应用 SPSS for Windows 16.0 进行聚类分析,查明南陵—泾县国家商品粮基地的农田区土壤中各金属元素聚类特征如图 2 所示。

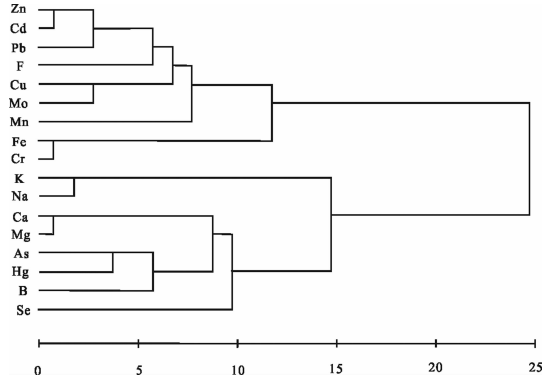

图 2　南陵—泾县农田区表层土壤中各元素聚类分析图

Fig. 2　Hierarchical clustering dendrogram of the elements in the farmland area of the Nanling-Jing county

从图 2 中可见,南陵—泾县国家商品粮基地农田区土壤中金属元素具有 4 种聚类特征:

(1)Zn、Cd、Pb、F、Cu、Mo 和 Mn 元素聚类在一个亚类内,该亚类性状特征是金属元素不活泼,变异系数中等,在空间分布上存在一定程度的变异性。

(2)Fe 和 Cr 元素聚类在一个亚类,其中 Fe、Cr 的变异系数分别为 18.31%和 15.18%,表明这些元素在空间分布上较均匀,空间变异性"较弱"。

(3)K 和 Na 元素为一个亚类,它们的化学性质相近,为活泼的碱金属元素,易于迁移转化,变异系数值大,空间变异性"较强"。

(4)Ca、Mg、As、Hg、B 和 Se 元素聚类在一个亚

类内，元素之间性状差异较大，其中 Ca、Mg 为不稳定的碱土金属，两者的变异系数值分别为 59.62% 和 55.15%，空间变异性“中等”。B、As 和 Se 为类金属或非金属，化学性质较不活泼。Hg 为化学性质稳定的重金属元素，变异系数介于 20.38%～105.65%，在空间分布上变异程度从“中等”至“较强”，较为复杂。

4 讨论

应用 SPSS 16.0 for Windows 技术，对南陵—泾县国家商品粮基地农田区土壤中各元素之间相关性分析和双尾检验，结果如表 3 所示。

4.1 土壤元素空间变异和聚类与背景环境关系

在南陵—泾县国家商品粮基地农田区表层土壤中，成土母质元素 Ca 与 Mg 之间具有显著的正相关，相关系数 0.625。K 作为土壤中主要元素，与 Ca 元素之间呈负相关，但与 Mg 元素之间相关性不显著。K 元素在土壤中活泼、易迁移，加之，该区地下水水位埋深较浅（大部分地区不足 1.50m）和降水、地表水产汇充沛，所以，研究区土壤中 K 的流失较为明显。Na 与 Ca、Mg 之间呈显著正相关，相关系数 0.756。Mo 元素与 Ca、Mg 元素之间呈负相关性。

Ca、Mg 与毒性金属元素 Pb、Cr 和 Hg 之间存在密切的正相关性，Cd 和 As 与 Ca 元素之间存在一定的正相关。这表明，在土壤环境偏酸性的土壤环境（pH 值＝ 6.08）中，南陵—泾县国家商品粮基地农田区土壤中毒性重金属元素（Pb、Cr、Hg、Cd 和 As）与土壤 Ca、Mg 等氧化物容易相结合，富集在表层土壤中，对农作物（粮食）生产安全带来一定程度的风险。广泛调查表明，在研究区农田表层土壤中，常见的金属元素有 Fe、Mn、Pb、Cd、Hg、Se、Cu 和 As，它们彼此之间呈显著正相关性，其中 Fe 与 Cr，Zn 与 Cu，Pb 与 Cd 和 Cu 之间相关性较高，存在相同的污染源可能性和基础，与上游山丘区金、铜矿开采等活动和农田区引灌上游山区的地表水有一定关系。

土壤微量元素反映土壤供给农作物矿物营养的能力，其丰缺状况直接影响农作物生长与发育（Zhang Xiaoxia et al.，2010），其中 Fe、Mn 元素是岩石圈普遍存在的两类变价金属元素，它们是组成土壤环境氧化还原体系的主要元素（Coulet R R et al.，2001；Gao Fan et al.，2004；Sun Jian et al.，2015）。土壤中金属元素呈不同形态存在，其中可溶

表 3 南陵—泾县基本农田表层土壤不同元素之间相关系数

Table 3 Correlation coefficients among elements in different topsoil samples in the Nanling-Jing county

	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cr	Cd	As	Hg	B	Mo	Se	F
Ca	1																
Mg	0.625**	1															
K	−0.006	0.051	1														
Na	0.476**	0.756**	−0.157**	1													
Fe	0.282**	0.524**	−0.196**	0.528**	1												
Mn	0.178**	0.051	−0.215**	0.017	0.371**	1											
Zn	0.144**	0.228**	0	0.168**	0.614**	0.385**	1										
Cu	0.347**	0.411**	−0.054	0.388**	0.690**	0.242**	0.758**	1									
Pb	0.253**	0.239**	0.034	0.239**	0.508**	0.248**	0.762**	0.767**	1								
Cr	0.411**	0.501**	−0.172**	0.498**	0.729**	0.152**	0.327**	0.629**	0.410**	1							
Cd	0.132**	0.021	0.07	−0.051	0.325**	0.275**	0.782**	0.549**	0.611**	0.100*	1						
As	0.278**	0.067	−0.104*	0.056	0.417**	0.362**	0.142**	0.301**	0.299**	0.460**	0.126**	1					
Hg	0.360**	0.266**	0.007	0.258**	0.161**	0.088*	0.179**	0.330**	0.344**	0.268**	0.186**	0.203**	1				
B	0.259**	0.113**	−0.140**	0.126**	−0.031	−0.008	−0.342**	−0.032	−0.113**	0.323**	−0.340**	0.313**	0.240**	1			
Mo	−0.011	−0.012	0.136**	−0.127**	0.395**	0.296**	0.584**	0.447**	0.470**	0.249**	0.482**	0.355**	0.01	−0.155**	1		
Se	0.162**	0.055	0.177**	0.036	0.237**	0	0.330**	0.398**	0.417**	0.255**	0.408**	0.268**	0.261**	0.042	0.346**	1	
F	0.176**	0.410**	−0.003	0.340**	0.714**	0.240**	0.761**	0.707**	0.591**	0.484**	0.524**	0.178**	0.139**	−0.164**	0.478**	0.334**	1

注：* 在 0.05 水平上显著相关；** 在 0.01 水平上显著相关。

态或有效态可被农作物吸收利用。在南陵—泾县农田区表层土壤中,Fe、Mn 元素含量普遍偏高,其中 Fe 含量高于全国现状背景值 10 倍以上。表层土壤中 Fe 元素的过量积累,会导致农作物受到 Fe 元素胁迫,影响其生长(Zou Yuanchun et al., 2009)。随着 pH 值的降低,金属元素的有效态含量增高。当土壤环境呈酸性时,Fe、Mn 元素的活性明显增强,对农作物造成的危害程度更加显著(Snowden R E D et al., 1993; Snowden R E D et al., 1995)。研究区土壤环境 pH 值平均为 6.08,较小值为 4.25,部分地区为 8.27。在监测的 541 个样点中,94.45%的 pH 值小于 7,呈弱酸性,其中 50%的 pH 小于 6。这种弱酸性的土壤环境,有利于金属元素迁移,也是南陵—泾县农田区土壤中 Fe 等金属元素含量普遍偏高的主要影响因素之一。

土壤中 Fe 元素含量高值分布区,主要分布在南陵—泾县农田区的南部,是双季水稻主产区。该地区松散第四系以青弋江冲积—湖积为主,水系发达,河网湖塘密集。双季水稻主产区的土壤环境决定了该区表层土壤中 Fe 元素的富集、迁移与转化(Kappler A et al., 2004)。在长期淹水条件下,水稻土表现为还原状态,土壤中有机质厌氧分解,导致土壤 Eh 与 pH 值向酸性变化,进而,影响 Fe、Mn 元素在土壤中迁移,这种环境易产生 Fe(II)和 Mn(IV)在土壤中积累(Bao Gende, 1991)。

农作物播种对土壤中金属元素区域分布也具有一定影响。从图 3 可见,在南陵—泾县中部和北部的平原农田区以一年两熟水稻、或一季小麦与一季水稻为主,在西南部的低岗地和东部傍青弋江两岸条带状旱地以豆类、旱地瓜类和蔬菜为主,在西部的丘陵区以林地为主。在西南部的丘陵及岗地土壤中,金属含量普遍较高,而中部的平原区金属含量较低。实地调查查明,在西部和南部山区分布有金、铜等采矿区,加之受成土母质岩性及其风化、侵蚀等影响,造成该区土壤中金属元素含量较高。在中部、北部的平原区,旱地土壤中金属元素含量低,但常年淹水的水稻田土壤中金属元素含量较高,尤其在北部的冲积—湖积平原的一年两熟制水稻种植区 Cr、Zn 含量呈显著富集特征,Cr 和 Zn 元素呈现相同外源输入特征,耕作层土壤岩性以亚粘土—粘土为主,与

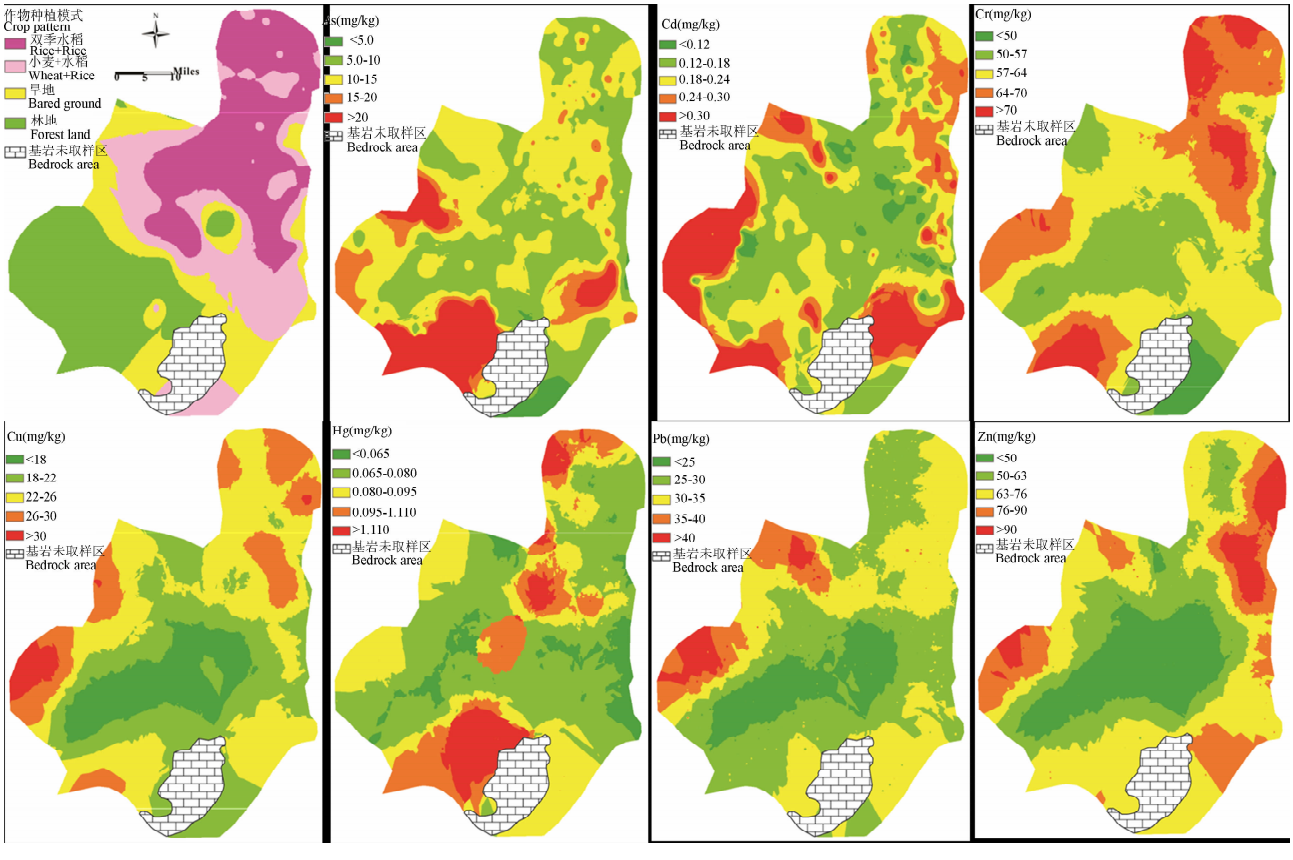

图 3　南陵—泾县基本农田作物种植模式及金属元素空间分布特征

Fig. 3　Distribution characteristics of crop patterns and metal elements in farmland of Nanling-Jing county

集约化养殖导致畜禽排泄物中含有大量的 Zn 等有关(Huang Zhiping et al., 2008; Lu Dong et al., 2005; Ren Shunrong et al., 2005)。在南陵—泾县的北部,湖塘密集,水产养殖业较为发达,周边农田引湖塘水浇灌农田,水源中含有 Zn、Cu 和 Cr 等元素。

4.2 土壤元素空间变异和聚类与地下水位埋藏状况关系

调查表明,土壤中 Fe、Mn 元素的含量及有效性与地下水位埋深有一定关系。表层土壤中 Fe 元素含量较高的分布区,地下水埋深普遍较浅(<2.0m)。在地下水位处于浅埋条件下,土壤水分含量将增大至邻近饱和状态,利于土壤水中 Fe 离子在土壤中积累(Esther C H et al., 2000)。

地下水位埋深和水中含盐量在一定程度上影响土壤盐分区域分布特征(Kahlown M A et al., 2005)。在南陵—泾县农田区,浅层地下水位埋深变化较大(图 4),对农田区土壤中化学组分(盐分)含量及其类型具有一定影响。从图 4 可见,自南陵—泾县的西南部丘陵岗地区至东北部平原区,土壤全盐量呈现逐渐降低的特征。根据表层土壤盐分含量多少,划分为 5 个等级分区,分别为全盐量小于 100×10^{-6},介于 $100\times10^{-6}\sim150\times10^{-6}$、$150\times10^{-6}\sim200\times10^{-6}$、$200\times10^{-6}\sim250\times10^{-6}$ 和大于 250×10^{-6}。

研究区基本农田土壤盐分分布特征与该区地下水位埋深分布特征之间呈现较为显著的一致。全盐量介于 $100\times10^{-6}\sim150\times10^{-6}$ 的分布区面积(502 km^2)所占比例最大,占研究区总面积的 59.76%,主要分布在研究区的中部及南部冲积—洪积平原地区,在研究区中部地区地下水位埋深介于 2~3m。其次为全盐量介于 $150\times10^{-6}\sim200\times10^{-6}$ 的分布区,分布面积 222km^2,占研究区总面积的 26.44%,主要分布在研究区的北部冲积—湖积平原区以及西部、南部丘陵岗地低洼地带,地下水位埋深较大。土壤全盐量小于 100×10^{-6}、介于 $200\times10^{-6}\sim250\times10^{-6}$ 和大于 250×10^{-6} 的分布区,面积分别占研究区总面积的 5.22%、5.37% 和 3.20%,主要分布在研究区的西部、南部丘陵岗地地区,且呈现条带状分布,地下水位埋深介于 1~2m,较浅地区不足 1.0m。地下水位埋深浅,潜水易蒸发消耗,造成土壤盐分积累加剧。

5 结论

(1)皖江经济区南陵—泾县基本农田表层土壤中元素含量大小顺序为 Fe>Mn>F>Zn>Cr>B>Pb>Ca>Cu>As>Na>K>Mg>Mo>Se>Cd>Hg。在南陵—泾县,存在区域内重金属元素异常:Fe、Cd、Hg 等元素含量平均值超过江淮流域土壤元素背景值 2 倍及以上。

(2)变异系数和系统聚类分析结果表明,南陵—泾县基本农田区土壤元素可分为 4 个亚类。不同元素之间空间变异程度差异显著,Fe、Pb 和 Cr 元素的

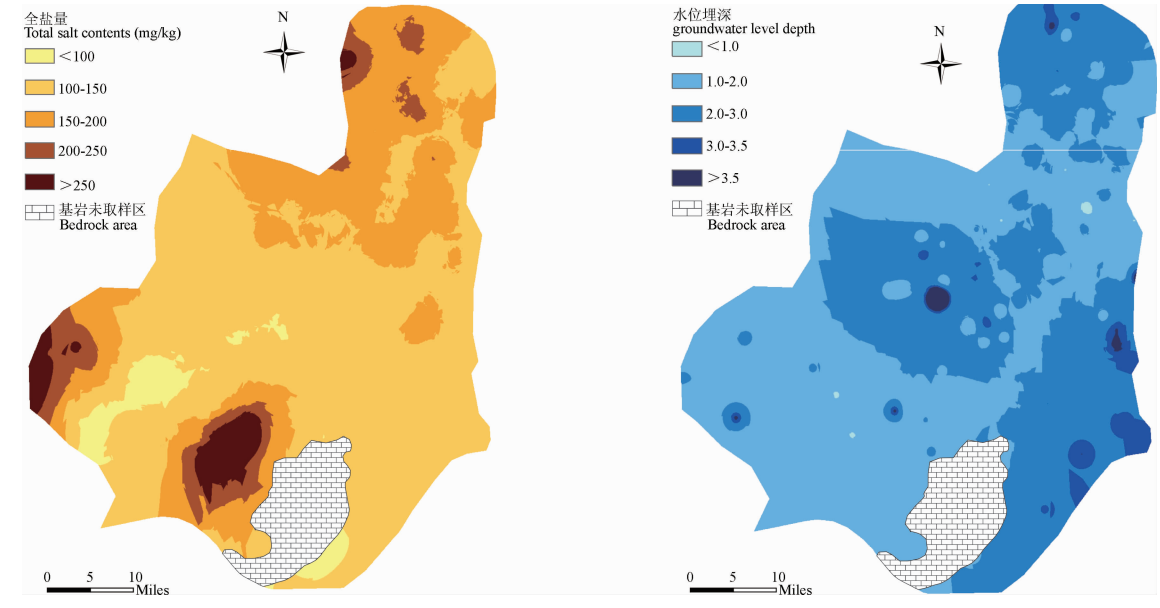

图 4 南陵—泾县基本农田土壤盐分和地下水埋深空间分布特征

Fig. 4 The distribution characteristics of total dissolved solids and groundwater level depth in farmland of Nanling-Jing county

空间变异程度较小,K、Hg 和 Se 元素空间变异程度大,且在一些地区有 K 流失现象。

(3)金属元素空间分布总体呈西南部高于东北部,水田高于旱地的趋势。金属元素的空间分布主要受地质成因和采矿等人类活动影响,此外,利用含有有害金属元素的湖塘水浇灌农田和施肥,可能是某些重金属元素区域性异常的成因。

(4)研究区表层土壤为硫酸盐为主导的弱酸性土,主要盐分离子为 SO_4^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、Ca^{2+} 和 Na^+。其中 SO_4^{2-}、HCO_3^- 和 Ca^{2+} 含量最高。盐分分布以西部及南部丘陵岗地为高值区,沿中部平原向东部青弋江逐渐过渡。0～20cm 土壤全盐量以 100×10^{-6}～200×10^{-6} 为主,分布面积约占研究区总体面积的 86.2%。盐分分布主要受地下水埋深及浅层地下水矿化度影响。

References

Bao Gende. 1991. Leading factor of controlling iron and manganese concretion geo: chemical feature. SCIENTIA SINICA (Chimica), 8: 860 ~ 866. (in Chinese without English abstract).

Chang Yuhu, Zhao Yuanyi, Cao Chong, Shan Yun, Cao Qiang. 2015. Characteristics of heavy metals content and assessment of health risk in different environment media in the Dexing copper mining area. Acta Geologica Sinica, 89(5): 889～898. (in Chinese with English abstract).

Chen Guoguang, Xi Xiaohuan, Liang Xiaohong, Liu Hongying, Zhang Ming, Tian Fujin. 2008. Soil geochemical baselines of the Yangtze river delta and their significances. Geoscience, 22(6): 1041～1048. (in Chinese with English abstract).

Chen Huaiman, Zheng Chunrong, Zhou Dongmei, Wang Shenqiang, Lin Yusuo. 2006. Some environmental quality: a review. Journal of Agro-Environment Science, 25(4): 821～827. (in Chinese with English abstract).

Chen Xingren, Chen Furong, Jia Shijun, Chen Yongning. 2012a. Soil geochemical baseline and background in Yangtze River-Huaihe River basin of Anhui Province. Geology in China, 39(2): 302～310. (in Chinese with English abstract).

Chen Xingren, Zhou Jun. 2012b. Features of distribution of trace elements in soils in the Jianghuai area, Anhui and analysis of the cause of formation. Geology of Anhui, 22(2): 123～129. (in Chinese with English abstract).

Coulet R R, Pick F R. 2001. Changes in dissolved and total Fe and Mn in a young constructed wetland: implications for retention performance. Ecological Engineering, 17(4): 373～384.

Dong Guotao, Luo Geping, Xu Wenqiang, Chen Li. 2010. Spatial variability of oasis soil available trace elements in the lower reaches of Sangong river watershed, North Xinjiang. Journal of Desert Research, 30(4): 862～869. (in Chinese with English abstract).

Esther C H, Alfons J P, Jan G M. 2000. Increased groundwater levels cause iron toxicity in Glyceria fluitans (L.). Aquatic Botany, 66: 321～327.

Fergusson J E. 1990. The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effect. Oxford: Pergamon Press.

Gao Fan, Jia Jianye, Mei Xueqing, Yang Muzhuang. 2004. The environmental meaning of trace element manganese and its chemical compound in soil. Guangdong Trace Elements Science, 11(4): 10～13. (in Chinese with English abstract).

Huang Changyong. 2000. Agrology (in Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Press: 192.

Huang Zhiping, Xu Bin. 2008. Spatial variability of Zinc and Copper in farmland soil irrigated with swine wastewater. Journal of Agro-Environment Science, 27(1): 126～132. (in Chinese with English abstract).

Kahlown M A, Ashraf M, Zia-ul-Haq. 2005. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields. Agricultural Water Management, 76(1): 24～35.

Kappler A, Benz M, Schink B. 2004. Electron shuttling via humid acids in microbial iron (III) reduction in a fresh water sediment. Microbiology Ecology, 47: 85～92.

Lei Ming, Zeng Min, Wang Lihong, Williams Paul N, Sun Guoxin. 2010. Aresenic, lead, and cadmium pollution in rice from human markets and contaminated areas and their health risk assessment. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(11): 2314～2320. (in Chinese with English abstarc).

Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xie Senchuan. 1988. Soil water dynamics. Beijing: Qinghua University Press: 321～366.

Li Xiangling, Zhou Taofa, Yuan Feng, Wang Yinquan, Sun Yingze. 2015. Pb enrichment and Pb isotope source appointment of soil in the Xinqiao mining area, Tongling, Anhui. Geological Review, 61(6): 1347～1358. (in Chinese with English abstract).

Lu Dong, Zong Lianggang, Xiao Xingji, Yang Yonggang, Zhou Zehong, Xi Yunguan. 2005. A comparison of heavy metals concentration in soils of organic and conventional farming in typical regions of eastern China. Journal of Agro-Environment Science, 24(1): 143～147. (in Chinese with English abstract).

Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants. 1991. Beijing: Chinese Agriculture Technology Press: 207 ~ 213. (in Chinese).

Pu Yulin, Zhang Zongjin, Liu Shiquan, Zhang Shirong, Deng Liangji. 2010. Transplant and accumulation characteristics of Ca, Mg, K and Na in Tibet soils. Journal of Soil and Water Conservation, 24(1): 86 ~ 90. (in Chinese with English abstract).

Ren Shunrong, Shao Yucui, Wang Zhengxiang. 2005. Analyze on heavy metals content of merchandise compost produced by animal wastes. Journal of Agro-Environment Science, 24 (expanded): 216～218. (in Chinese with English abstract).

Shan Ping, WuZhenwei, Huang Jieying, Tang Xiaofei, Wang Jiayuan. 2015. Distribution analysis and Risk Assessment of Hg in soils around a coal-fired power plant in Anhui. Environmental Monitoring in China, 31(5): 86～92. (in Chinese with English abstract).

Sun Jian, Zhu Xiangkun. 2015. Fe isotope geochemistry of earth surface system. Geological Review, 61(6): 1370～1382. (in Chinese with English abstract).

Snowden R E D, Wheeler B D. 1993. Iron toxicity to fen plant species. Journal of Ecology, 81(1): 35～46.

Snowden R E D, Wheeler B D. 1995. Chemical changes in selected wetland plant species with increasing Fe supply, with specific reference to root precipitates and Fe tolerance. New Phytologist, 131: 503～520.

Wang Bingxi, Cao Xian. 2008. Preliminary study on soil characteristics of flight area at Xining Caojiabao airport. Journal of Desert Research, 28(1): 137～141. (in Chinese with English abstract).

Wang Shaoqiang, Zhu Songli, Zhou Chenghu. 2001. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China. Geographical Research, 20(2): 161～169. (in Chinese with English abstract).

Wang Shuying, Lu Ping, Wang Jianli, Yang Liu, Yang Kai, Yu Tongquan. 2008. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: a case study in Pinggu county, Beijing. Acta Ecological Sinica, 28(10): 4957～4964. (in Chinese with English abstract).

Wang Zhong. Plant Physiology(in Chinese). 2000. Beijing: Chinese Agriculture Press: 80～89.

Wei Fusheng, Yang Guozhi, Jiang Dezhen, Liu Zhihong, Sun Benmin. 1991. The basic statistical characteristic value and background value of China soil element. Environmental Monitoring in China, 7(1): 1～6. (in Chinese with English abstract).

Wei Hualing, Zhou Guohua, Sun Binbin, Liu Zhanyuan, Zeng Daoming. 2013. Element content and mineral compositions in different sizes of soil in Tongling, Anhui Province. Geological Bulletin of China, 32(11): 1861～1866. (in Chinese with English abstract).

Wu Chunhua, Chen Xin, Wang Zhaoqian. 2004. Lead absorption by weeds from lead-polluted soil. Chinese Journal of Applied Ecology, 15(8): 1151～1154. (in Chinese with English abstract).

Xu Jialin, Yang Jurong. 1995. Heavy metals in terrestrial ecosystems. Beijing: China Environmental Science Press. (in Chinese).

Yang Zhongfang, Cheng Hangxin, Xi Xiaohuan, Liu Aihua. 2005. Regional ecological geochemical assessment: ideas and prospects. Geological Bulletin of China, 24(8): 687～693. (in Chinese with English abstract).

Zhang Xiaoxia, Li Zhanbin, Li Peng. 2010. Study on distribution characteristics soil trace elements of grass land in the loess plateau. Journal of Soil and Water Conservation, 24(5): 45～67. (in Chinese with English abstract).

Zhou Jun, Zhu Jiang, Zha Shixin, Han Zhongyi, Qin Ying. 2001. Soil micronutrient status as related to geological background in Anhui Province. Jounal of Nanjing Agricultural University, 24(1): 59～64. (in Chinese with English abstract).

Zhu Lixin, Ma Shengming, Wang Zhifeng. 2006. Soil eco-geochemical baseline in alluvial plains of eastern China. Geology in China, 33(6): 1400～1405. (in Chinese with English abstract).

Zhu Yinmei, Zhou Qixing. 1999. Status theory and outlook for soil pollution and protection of agricultural environment in China. Chinese Jounal of Soil Science, 30(3): 132～135. (in Chinese with English abstract).

Zou Yuanchun, Lv Xianguo, Jiang Ming, Dai Guohua. 2009. Seasonal variation of iron content in typical wetland plants and in wetland farmland crops in sanjiang plain of northeast China. Chinese Journal of Ecology, 28(2): 216～222. (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

鲍根德. 1991. 控制铁锰结核地球化学特征的主导因素研究：I 铁锰结核的地球化学特征. 中国科学（B 辑），8：860～866.

常玉虎，赵元艺，曹冲，单云，曹强. 2015. 德兴铜矿区主要流域内环境介质中重金属含量特征与健康风险评价. 地质学报，89(5)：889～908.

陈国光，奚小环，梁晓红，刘红樱，张明，田福金. 2008. 长江三角洲地区土壤地球化学基准值及其应用探讨. 现代地质，22(6)：1041～1048.

陈怀满，郑春荣，周东美，王慎强，林玉锁. 2006. 土壤环境质量研究回顾与讨论. 农业环境科学学报，25(4)：821～827.

陈兴仁，陈富荣，贾十军，陈永宁. 2012a. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究. 中国地质，39(2)：302～310.

陈兴仁，周俊. 2012b. 安徽江淮地区土壤微量元素分布特征及成因分析. 安徽地质，22(2)：123～129.

董国涛，罗格平，许文强，谌莉. 2010. 三工河流域下游绿洲土壤微量元素有效含量空间变异特征. 中国沙漠，30(4)：862～869.

高凡，贾建业，梅雪清，杨木壮. 2004. 土壤中微量元素锰及其化合物的环境意义. 广东微量元素科学，11(4)：10～13.

黄昌勇. 土壤学. 2000. 北京：中国农业出版社：192.

黄治平，徐斌. 2008. 规模化猪场废水污灌农田的土壤 Zn 和 Cu 空间变异分析. 农业环境科学学报，27(1)：126～132.

雷鸣，曾敏，王利红，Williams Paul N，孙国新. 2010. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评价. 环境科学学报，30(11)：2314～2320.

雷志栋，杨诗秀，谢森传. 土壤水动力学. 1988. 北京：清华大学出版社：321～366.

李湘凌，周涛发，袁峰，王银泉，孙缨泽. 2015. 安徽铜陵新桥矿区土壤 Pb 的富集特征及 Pb 同位素源解析. 地质论评，61(6)：1347～1358.

卢东，宗良纲，肖兴基，杨永岗，周泽红，席运官. 2005. 华东典型地区有机与常规农业土壤重金属含量的比较研究. 农业环境科

学学报，24(1)：143～147.
蒲玉琳，张宗锦，刘世全，张世熔，邓良基. 2010. 西藏土壤钙、镁、钾、钠的迁移和聚集特征. 水土保持学报，24(1)：86～90.
任顺荣，邵玉翠，王正祥. 2005. 利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析. 农业环境科学学报，24(增刊)：216～218.
单平，伍震威，黄界颍，唐晓菲，汪家源. 2015. 安徽某燃煤电厂周边土壤汞分布特征及风险评价. 中国环境监测，31(5)：86～92.
孙剑，朱祥坤. 2015. 表生过程中铁的同位素地球化学. 地质论评，61(6)：1370～1382.
王秉玺，曹先. 2008. 西宁曹家堡机场飞行区土壤养分特征的初步研究. 中国沙漠，28(1)：137～141.
王绍强，朱松丽，周成虎. 2001. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征. 地理研究，20(2)：161～169.
王淑英，路苹，王建立，杨柳，杨凯，于同泉. 2008. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征—以北京市平谷区为例. 生态学报，28(10)：4957～4964.
王忠. 2000. 植物生理学. 北京：中国农业出版社：80～89.
魏复盛，杨国治，蒋德珍，刘志虹，孙本民. 1991. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征. 中国环境监测，7(1)：1～6.
魏华玲，周国华，孙彬彬，刘占元，曾道明. 2013. 安徽铜陵地区不同粒级土壤中元素含量与矿物组成分布特征. 地质通报，32(11)：1861～1866.
吴春华，陈欣，王兆骞. 2004. 铅污染土壤中杂草对铅的吸收. 应用生态学报，15(8)：1151～1154.
许嘉琳，杨居荣. 1995. 陆地生态系统中的重金属. 北京：中国环境科学出版社.
杨忠芳，成杭新，奚小环，刘爱华. 2005. 区域生态地球化学评价思路及建议. 地质通报，24(8)：687～693.
张晓霞，李占斌，李鹏. 2010. 黄土高原草地土壤微量元素分布特征研究. 水土保持学报，24(5)：45～67.
周俊，朱江，查世新，韩忠义，秦颖. 2001. 安徽省土壤微量元素状况与地质背景的关系. 南京农业大学学报，24(1)：59～64.
朱立新，马生明，王之峰. 2006. 中国东部平原土壤生态地球化学基准值. 中国地质，33(6)：1400～1405.
朱荫湄，周启星. 1999. 土壤污染与我国农业环境保护的现状、理论和展望. 土壤通报，30(3)：132～135.
邹元春，吕宪国，姜明，戴国华. 2009. 典型湿地植物与湿地农田作物铁含量的季节变化特征. 生态学杂志，28(2)：216～222.

The Character and Influencing Factors of Geochemical Distribution in Basic Farmland of Economic Zone along Yangzte River in Anhui

WANG Qian, ZHANG Guanghui, TIAN Yanliang, YAN Mingjiang, ZHANG Xiyu

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology,
Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061

Abstract

The basic agricultural farmland which distributed in economic zone along Yangtze river in Anhui is the principle grain producing area. The grain security is closely related to the soil geochemical characteristics in this area. Selecting the marketable grain producing farmland in Nanling-Jing county as the study area, basing on the field survey and the chemical contents data of top soil(0～20cm), using geo-statistic methods and GIS technology, this paper analyzes the contents, spatial distribution and variation, impact factors of basic elements in farmland soil. The results show that some heavy metal elements displayed regional abnormal distribution (Fe and Mn) and localized anomaly (Hg). Correlation analysis indicates that the elements Ca, Mg and Na significantly correlated each other and have high concentration in topsoil which shows the controlling of parent materials. Generally, the spatial distribution character of heavy metal elements and salinity presents that southern area has higher contents than northern area in Nanling-Jing county farmland. This phenomenon is related to hydrogeological condition, groundwater depth and groundwater salinity. Thus farmland located in southern area may in bad condition for high quality grain products.

Key words: marketable grain base; geochemistry; basic farmland; heavy metal; soil salinty