

# 苏南地区耕地质量评价与分区保护研究

陈诚<sup>1,2</sup> 林晨<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008)

**【摘要】**耕地质量监测与评估研究是我国耕地保护工作的重要支撑。针对苏南地区耕地保护面临的新问题, 整合农用地分等定级、多目标地球化学调查和土壤侵蚀等相关研究资料, 重构耕地综合质量评估指标体系, 综合运用空间分析、加权综合和聚类分析方法, 根据耕地基础地力、耕地健康和耕地外部环境的空间分异和组合特征, 识别优先保护、地力提升、污染治理和水土保持等耕地类型, 分类讨论耕地保护与整治路径。分析表明: 苏南地区现状耕地中, 优质耕地占比不足65%, 近30%的耕地基础地力较差, 超过5%的耕地受到水土流失、重金属污染威胁。其中, 优质耕地集中于茅山以东的太湖平原和沿江平原地区, 茅山以西地区基础地力相对较差, 宁镇沿江、太湖东北岸部分地区土壤重金属污染和水土流失风险较高, 需要因地制宜开展地力提升、土壤修复、水土保持和农业结构调整等治理措施, 以增强地产农产品质量安全。

**【关键词】**耕地质量评价; 耕地健康; 耕地外部环境; 苏南地区

**【中图分类号】**p967/k902

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1004-8227(2016)12-1860-10

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201612009

耕地是农业生产的主要载体, 耕地的质量与农业可持续发展和农产品质量安全密切相关。对于人多地少、耕地紧张的中国, 耕地质量问题事关国家农产品供给安全。长期以来, 耕地及其质量变化一直是学界和政府管理部门关注的热点, 学者们对耕地质量评估、耕地产能、土壤环境健康等方面开展了深入探讨, 取得了长足进展。

以往的耕地质量评价研究, 从关注耕地自然质量, 逐步发展为兼顾自然和利用质量<sup>[1, 2]</sup>。自然质量主要考虑立地条件、土壤条件和农田设施配套等因素, 利用质量重点考察农机、农膜、农电等投入因素, 评价指标体系逐步完善<sup>[3, 4]</sup>。空间与统计分析技术的应用, 较好解决了评价指标的空间特征表达和指标叠合问题; 为克服矢量数据数据量大、运算较为复杂的问题, 学者们还探讨了基于栅格数据的耕地质量评价方法<sup>[5, 6]</sup>。在农产品质量安全备受关注的时代背景下, 耕地健康成为耕地质量评价研究关注的新因素。路婕等以农用地分等成果为基础, 引入土壤环境质量修正系数, 建立耕地综合质量评价方法<sup>[7]</sup>。刘需珈等<sup>[8]</sup>通过整合农用地分等和土壤质量地球化学评估成果, 划分耕地质量监测区与类型图, 开展不同类型区耕地质量监测及管理讨论。李强等<sup>[9]</sup>从耕地质量、产能和土壤环境质量方面构建指标体系, 开展乡镇企业发达地区的耕地健康水平评价, 证实了乡镇企业集聚对于耕地健康的负面效应。土壤环境质量因子的引入, 丰富了耕地质量评价的内涵, 但对于不同尺度、不同类型地域研究中, 因素选择与组合等方面仍有深入讨论的空间。

**收稿日期:** 2016-08-01; **修回日期:** 2016-10-31

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41101161) [National Natural Science Fundation of China(41101161)]

**作者简介:** 陈诚(1983~), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事乡村发展与GIS应用研究. E-mail: chchen@niglas.ac.cn

苏南地区素有“鱼米之乡”的美誉，改革开放以来，工业化城市化快速推进，耕地规模大幅减少、耕地用途快速转换，从“平衡自给区”变成“严重缺粮”的“粮食主销区”<sup>[10~12]</sup>。耕地的非粮化，客观上加大了农药、化肥的施用强度，农田面源污染凸现。安琼等研究证实，苏南地区农田土壤有机氯农药残留普遍存在，传统菜地土壤残留量较高，叶菜种植土壤最高、稻田土壤最低<sup>[13]</sup>。耕地的非农化，带来了大量工业和生活污染排放<sup>[14]</sup>，李小曼等<sup>[15]</sup>对苏南典型产业园、村镇区的研究证实，化工印染、冶金机械、电子、火电等企业的集聚导致“三废”过量排放，污染物通过干或湿沉降、水体运移等过程造成周边农田区域土壤Cu、Pb、Cd、Ni、Cr等重金属和多环芳烃等有机物污染<sup>[15~18]</sup>。尽管个别采样地区农产品和饮水分析并未发现受到重金属等严重污染<sup>[19]</sup>，但苏南地区耕地的健康状况值得关注。

鉴于此，本文立足已有研究，结合苏南地区实际，从区域尺度入手，综合耕地地力、土壤健康以及外部条件分析，开展农产品质-数量安全导向下的耕地质量评估，揭示大规模工业化和城市化影响下苏南耕地质量的空间分异特点，划分耕地质量与治理类型区，讨论不同类型区耕地健康保护与治理重点，以期为苏南地区的农产品质量安全保障和农业现代化发展提供科学支撑。

## 1 研究方法

研究区概况。研究区覆盖江苏南部的南京、无锡、常州、苏州和镇江5市，东靠上海、西连安徽、南接浙江、北依长江，是江苏经济最发达的区域，也是我国人口和经济密度最高区域之一，国土面积2.8万km<sup>2</sup>，2014年五市常住人口量逾3 300万，城镇化率接近75%，人均GDP突破11万元。全区四季分明、雨热同期，其中茅山以东属太湖平原，地势平坦、河湖众多，茅山以西为宁镇丘陵，低山缓丘、岗地、平原相间。区内水稻土、黄棕壤分布较为广泛，农业耕作自然条件优越。在城镇化挤压下，耕地空间日益萎缩，近五年苏南地区耕地减少了约2.5个百分点，耕地污染也常见报道<sup>[18]</sup>。

资料来源。主要包括苏南五市国土部门提供的农地分等定级资料(1:5万)、多目标区域地球化学调查成果(采样点分布1 km\*1 km)和2010年土地利用现状分布资料(1:5万)，还包括研究区90m空间分辨率的DEM、气象站点观测和TM遥感监测数据(30米空间分辨率)，以及对国土和农业管理等部门的耕地质量访谈材料。

研究方法。包括评价指标体系构建、指标量化与集成和耕地质量分类分区。①指标体系构建：借鉴现有研究<sup>[5~7]</sup>，遵循综合性、主导性、空间差异性等基本原则，兼顾数据可获取性和苏南地区的实际，围绕耕地自然质量导向，从基础地力、耕地健康和外部环境等方面遴选指标。基础地力表征耕地对作物生长的直接支撑能力<sup>[20]</sup>，包括pH值、有机质含量、全磷、有效钾以及耕作层厚度等因子。耕地健康刻画土壤的有机物、重金属污染程度<sup>[21]</sup>，考虑数据可获得性和苏南土壤环境背景与现状，选择As、Pb、Cu、Hg等重金属元素(表1)。此外，受地形、降水等作用的土壤侵蚀状况也是影响耕地质量的重要外部条件。②数据处理：首先，利用农地分等定级数据库，通过空间选择分析提取耕地基础地力评价指标。其次，根据多目标地球化学调查采样数据，通过空间插值(假定重金属元素含量符合二阶平稳和本征要求，采用球形函数进行半变异分析，通过kriging方法进行空间插值)和插值栅格重分类，叠置耕地图斑获取耕地健康评价指标。借鉴Wischmeier和Smith(1978)建立的土壤侵蚀模型(公式5)，估算耕地土壤侵蚀强度，其中，坡长L和坡度S借助DEM数据分析获取，土壤可蚀性因子K和水土保持因子P值通过已有研究与专家经验调查比较获取，降雨侵蚀力因子R结合气象资料计算，植被覆盖因子C根据土地覆盖类型赋值<sup>[22, 23]</sup>。③评价分析：参考《农用地质量分等规程》(GB/T 28407-2012)、土壤环境质量标准(GB15618-1995)和相关研究<sup>[24, 25]</sup>，根据各指标对耕地质量的影响规律差异，利用S形隶属函数对有机质含量、全磷、有效钾和耕作层厚度等指标赋值(公式1)，运用抛物线形隶属函数对pH值进行量化(公式2)，采用反S型隶属函数对重金属元素含量和土壤侵蚀等指标赋值(公式3)，并采用极值法进行指标值标准化(公式4)。其次，以信息熵方法获取各评价指标的初始权重，以此为基础开展国土、农业部门专家的权重经验调查，经过多轮打分修正，收敛后，提取组内指标权重<sup>[26, 27]</sup>(表1)，加权求和获取各评价单元耕地基础地力指数、耕地健康指数、耕地外部环境指数和综合质量指数(公式6)。第三，根据基础地力指数、耕地健康指数和耕地外部环境指数的空间组合(表2)，划分优先保护、地力提升、污染防治和水土保持等耕地整治与保护类型区，讨论耕地保护与管制的关键路径。

表 1 耕地质量评价指标与权重

Tab.1 Evaluating Indicators System and Their Weights of Cultivated Land Quality Analysis

指标类别层	指标层	因子层	权重
基础地力	养分因素	土壤有机质	0.295 5
		全磷	0.114 3
		有效钾	0.082 9
	立地条件	pH值	0.264 5
		耕作层厚	0.242 8
		As	0.233 9
耕地健康	重金属元素	Pb	0.269 3
		Cu	0.279 0
		Hg	0.217 8
		地形位指数、降雨侵蚀、水土保持因子、植被覆盖因子和土壤可蚀因子	1.000 0
外部环境	土壤侵蚀强度		

表 2 耕地质量指标组合与分类

Tab.2 Classification of Cultivated Land Quality Based on Integrated Evaluating Indicators

土壤理化性状	土壤环境质量	外部条件	保护与治理类型
好或中等	好或中等	好或中等	优先保护型
差	好或中等	好或中等	地力提升型
好或中等	差	好或中等	污染防治型
好或中等	好或中等	差	水土保持型

$$I(x) = \begin{cases} 1 & x > m_1 \\ x/m_1 & x \leq m_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$I(x) = \begin{cases} 1 & m_1 \leq x \leq n_1 \\ \frac{x-m_2}{m_1-m_2} & m_2 \leq x \leq m_1 \\ \frac{n_2-x}{n_2-n_1} & n_2 \leq x \leq n_1 \\ 0 & x < m_2 \text{ 或 } x > n_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq m_1 \\ \frac{m_2-x}{m_2-m_1} & m_2 \leq x \leq m_1 \\ 0 & x > m_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$I(x_i)' = (I(x_i) - I(x_i)_{\min}) / (I(x_i)_{\max} - I(x_i)_{\min}) \quad (4)$$

$$A = R \times L \times S \times K \times C \times P \quad (5)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^{10} I(x_i)' \times W_i \quad (6)$$

式中，x为因素指标值；I(x)为指标值的隶属函数量化值；I(x)'为指标量化结果的标准化值；m<sub>1</sub>、m<sub>2</sub>、n<sub>1</sub>、n<sub>2</sub>分别评价指标的临界值，主要参考耕地和土壤环境质量标准及地方实际确定；A为单位时间和面积的土壤流失量；R为降雨侵蚀力因子；L是坡长；S为坡度；K为土壤可蚀性因子；C为植被覆盖因子、P为水土保持因子。S<sub>y</sub>为耕地基础地力指数、耕地健康指数或耕地外部环境指数，W<sub>i</sub>为指标权重。

## 2 耕地质量评价

耕地基础地力。包括有机质、全磷、有效钾和土壤耕作层厚度等因子，对农作物的健康成长具有重要支撑作用，长期以来苏南地区耕地土壤的理化性状发生了较大变化。

(1) 土壤有机质。是影响耕地肥力的重要因素，总体呈西少东多的分布特征，茅山以西地区耕地相对贫瘠，土壤有机质含量多低于17.0 g/kg，部分丘陵岗地地区含量低于10.0 g/kg。茅山以东地区耕地土壤的有机质含量多高于19.0 g/kg，其中，太湖东北部的部分地区含量高达24.0 g/kg，土壤较肥沃(图1)。

(2) 全磷。与有机质含量的格局相似，茅山以西地区耕地土壤全磷含量较少，多低于0.65 g/kg，其中茅山和天目山山麓地区最低，局地低至0.45 g/kg。茅山以东地区分布特征略有差异。(图1)。

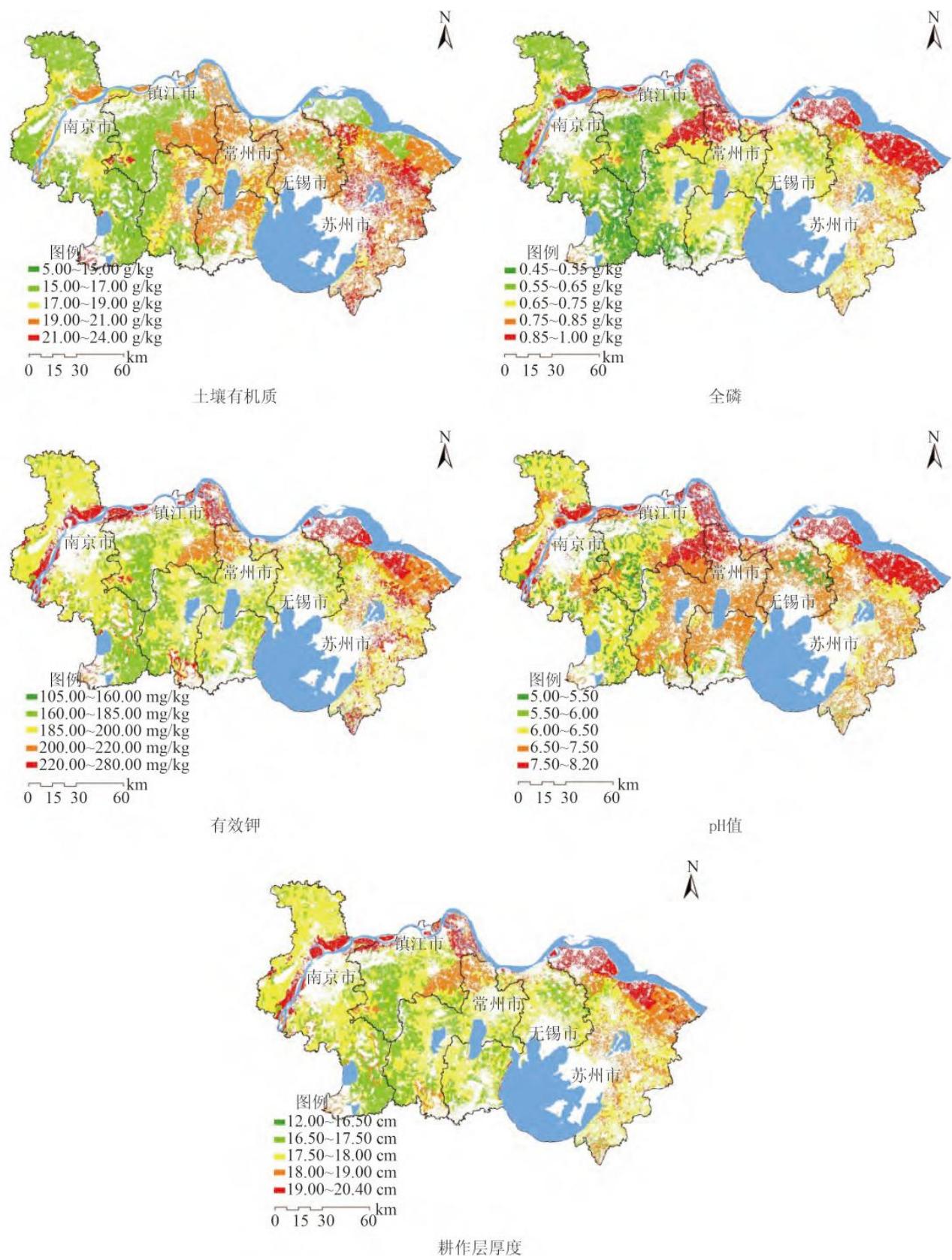
(3) 有效钾。与有机质、全磷不同，中部茅山周边丘陵岗地地区耕地钾元素较为缺乏，土壤有效钾含量多低于180 mg/kg；沿江平原地区耕地有效钾元素最丰富，含量多高于200 mg/kg，局部地区高达280 mg/kg；茅山以东部的太湖水网平原地区中等，有效钾含量多位于180~200 mg/kg之间(图1)。

---

(4) pH值。对耕地土壤肥力具有重要影响，呈现显著空间梯度差异。受海潮顶托江水侵润影响，沿江平原地区耕地土壤呈弱碱性，pH值位于7.5~8.2之间。茅山以西地区耕地土壤呈弱酸性，pH值多位于6.0~6.5之间；茅山以东地区接近中性，pH值位于6.5~7.5之间。茅山-天目山山麓丘陵岗地和无锡东北部地区耕地土壤酸性较强，pH值多低于5.5(图1)。

(5) 耕作层厚度。耕作层是农作物生长的基础、也是农业生产能力的根本。沿江平原地区耕地土壤有效耕作层厚度较大，多高于20 cm，最处厚达47 cm，农业生产条件较好。受地质地貌条件限制，茅山-天目山麓丘陵岗地地区耕地耕作层较薄，大多低于17 cm。茅山东西两侧大部分平原地区耕地有效耕作层厚度位于17~20 cm之间(图1)。

耕地健康。耕地健康对于农产品的质量安全具有重要影响。改革开放以来，苏南地区迅猛的工业化和城市化开发，一定程度上影响了耕地环境质量。耕地样本点位重金属元素插值拟合值与样本值对比分析表明，空间插值效果总体较好，误差范围多在10%以内(表3)。



## 图 1 耕地基础地力条件

Fig.1 Indicators of Cultivated Land Soil Physical and Chemical Attributes

表 3 插值误差分析

Tab.3 Error Range of Spatial Interpolation for Cultivated Land Soil Heavy Metal Elements

元素名称	样本最小值(mg/kg)	样本最大值(mg/kg)	拟合误差范围(mg/kg)	拟合误差比例范围(mg/kg)
As	6.76	13.34	-0.65~+0.73	-5.5%~+9.8%
Cu	18.79	50.11	-1.62~+1.45	-8.1%~+3.6%
Pb	21.90	37.41	-2.42~+1.71	-10.2%~+6.1%
Hg	0.035	0.278	-0.003 1~+0.003 6	-7.2%~+2.4%

(1) As。与肥力因素相反,耕地土壤As元素分布呈西高东低的格局,茅山以西地区耕地土壤As含量多高于8.5 mg/kg,以东地区多位于7.5~8.5 mg/kg之间,沿江平原东部地区低于7.5 mg/kg。受采矿、工业企业集聚的影响,西南部丘陵岗地地区、宁镇沿江地区、无锡东北部和苏州澄湖北部地区的耕地土壤As元素含量较高,局地含量超过13mg/kg,但仍符合农地环境质量一级标准(图2)。

(2) Pb。与As元素相反,Pb元素分布呈西低东高趋势,茅山以西地区多低于28 mg/kg,茅山以东地区位于28~35 mg/kg之间。与矿采、污染工业企业集聚格局对应,西部宁镇沿江、茅山-天目山麓丘陵岗地地区耕地土壤pb元素富集程度较高,局地Pb元素含量达到或超过40 mg/kg,是国家一级环境质量标准的1.15倍(图2)。

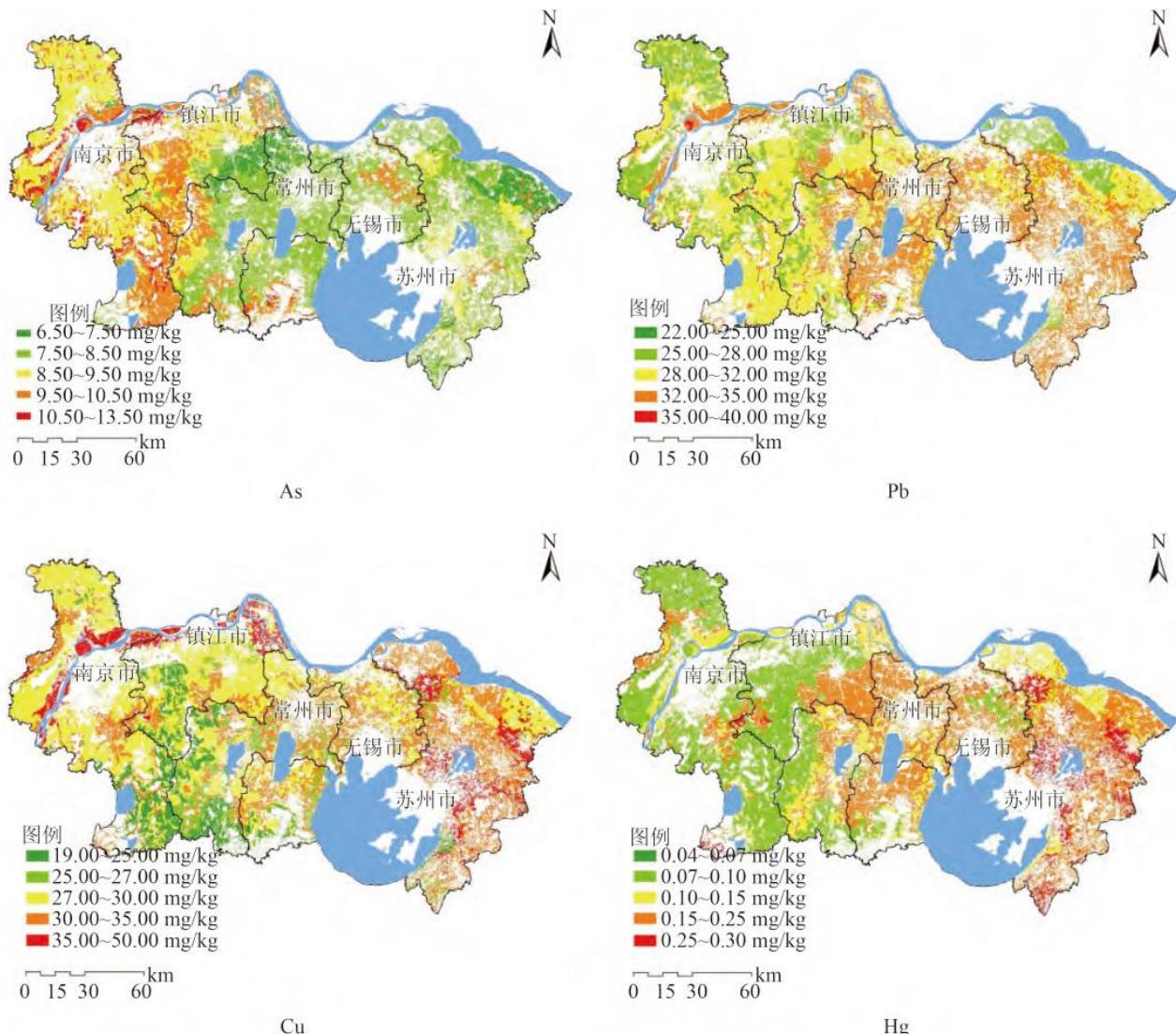


图2 耕地健康状况

Fig.2 Indicators of Cultivated Land Soil Heavy Metal Elements

(3) Cu。与As和Pb元素不同，苏南地区耕地土壤Cu元素分布呈中部低、东西高的格局。中部茅山-天目山麓丘陵岗地地区耕地土壤Cu元素含量多低于 $25\text{ mg/kg}$ ，茅山以东地区位于 $30\sim35\text{ mg/kg}$ 之间，茅山以西地区处于 $25\sim30\text{ mg/kg}$ 之间。其中，西部宁镇沿江、太湖东北部地区耕地土壤Cu元素较为富集，局地Cu元素含量达到或超过 $50\text{ mg/kg}$ ，仅符合农地环境质量二级标准(图2)。

(4) Hg。茅山以西地区耕地土壤Hg元素含量多低于 $0.15\text{ mg/kg}$ ，符合农地土壤环境一级标准。相反，茅山以东地区略高，多位于 $0.15\sim0.25\text{ mg/kg}$ 之间，其中，苏州北部、东部和南部部分地区耕地土壤Hg元素富集，局地Hg元素含量超过 $0.3\text{ mg/kg}$ ，是一级环境标准的两倍(图2)

耕地外部环境。根据公式5，估算苏南地区耕地土壤侵蚀强度。受地质地貌、植被覆盖、降水、农业开发与水土保持等因素

的综合作用，苏南地区耕地土壤侵蚀也呈自西到东、从低到高的梯度变化。茅山-天目山周边丘陵岗地地区，地形有起伏，但植被覆盖良好，且农业多以经济林果为主，耕地土壤侵蚀强度较低，年侵蚀量多低于 $2\ 300\ kg/hm^2$ 。茅山以西的江淮平原地区耕地土壤侵蚀强度中等，年侵蚀量多位于 $2\ 300\sim2\ 600\ kg/hm^2$ 之间。茅山以东、特别是太湖以东地区，虽然地势平坦，但蔬菜瓜果等经济作物种植比例较高，农业开发强度大，水土保持设施不够完善，耕地土壤侵蚀较强，年侵蚀量多位于 $2\ 900\sim3\ 200\ kg/hm^2$ 之间，太湖东北部局部超过 $3\ 600\ kg/hm^2$ ，耕地水肥流失较多，不利于耕地培肥(图3)

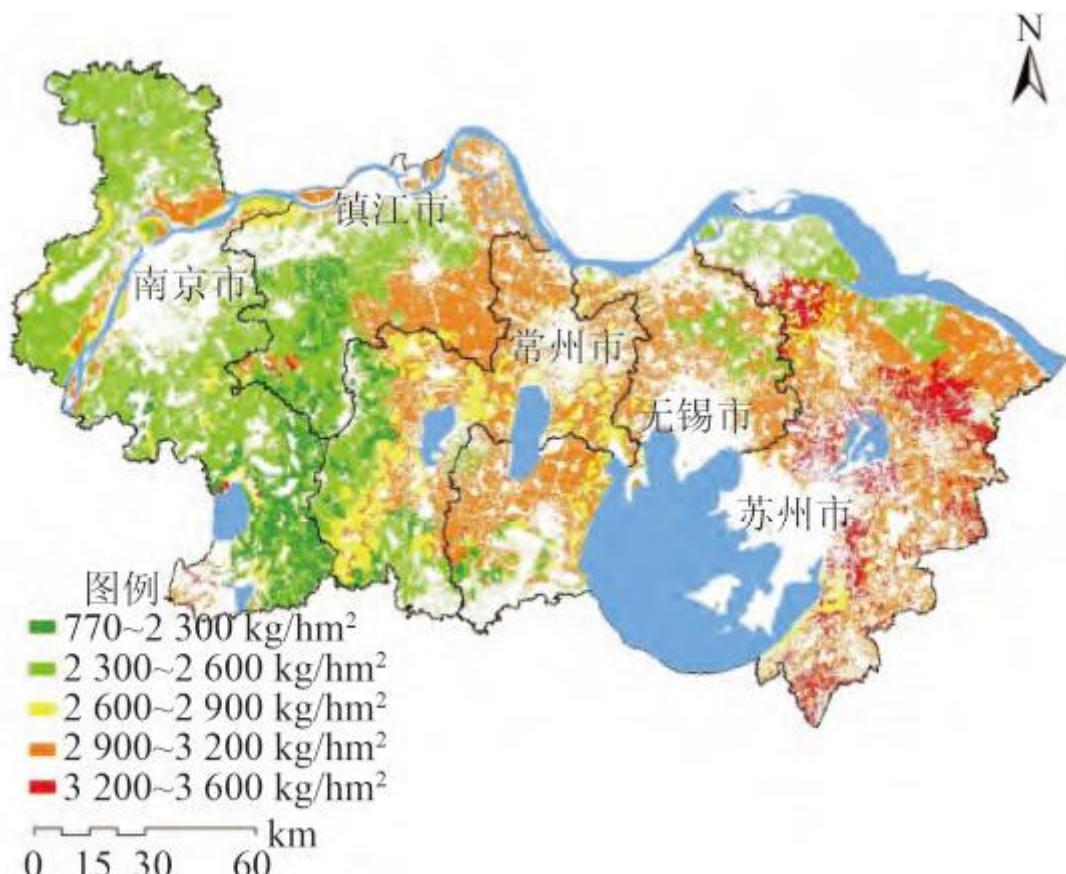


图3 土壤侵蚀分布

Fig.3 Cultivated Land Soil Erosion Assessment

综合质量评价。按照公式6和表1，分别计算耕地基础地力、耕地健康和耕地外部环境指数。整体上，基础地力和外部环境西弱东强、西差东好，耕地健康水平西高东低。茅山以东大部分耕地土壤较为肥沃、耕层深厚、重金属污染风险较低，保肥能力较好，质量较好。茅山-天目山周边丘陵岗地区域耕地耕作层较薄、土壤较为贫瘠，综合质量较差。宁镇沿江平原地区、太湖东北部部分地区土壤重金属元素较为富集，重金属污染的潜在风险较高，土壤侵蚀较为严重，质量也较差。茅山以西大部分耕地质量一般(图4)。

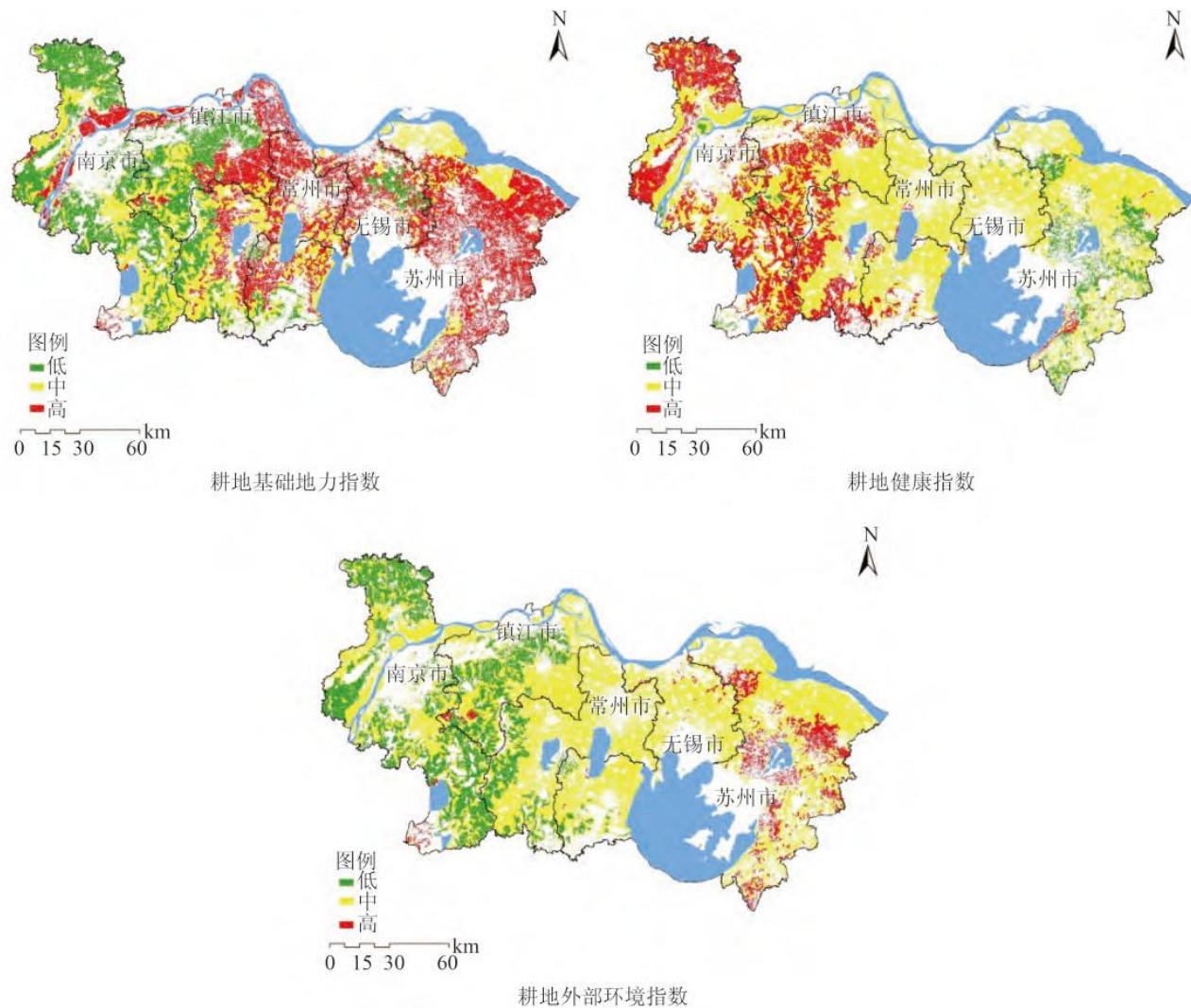


图4 耕地综合质量评价

Fig.4 Cultivated Land Comprehensive Quality Assessment

### 3 耕地质量分区与整治引导

根据耕地基础地力、健康水平和外部环境的空间差异，按照表2的类型组合思路，识别优先保护、地力提升、污染治理以及水土保持为主的耕地治理与保护类型区（表4和图5）。

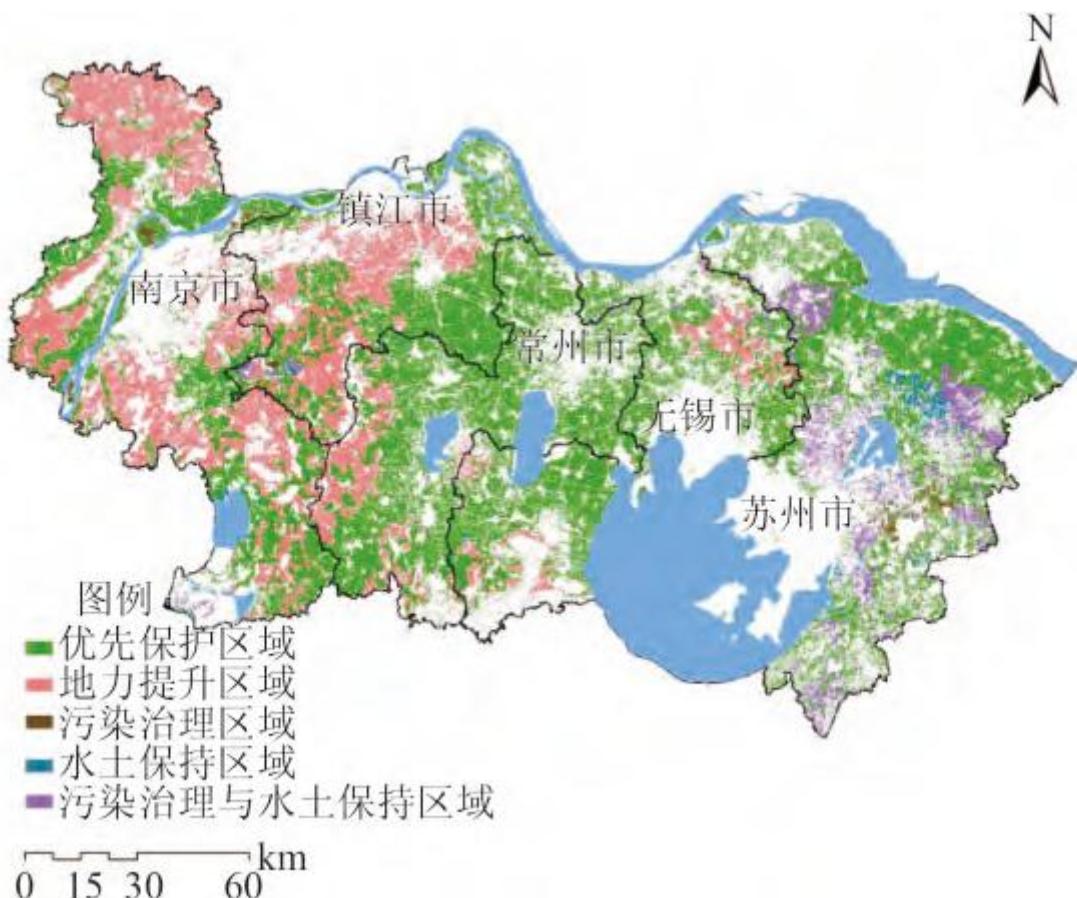
优先保护区。约 $5\ 120\ km^2$ ，占苏南地区耕地总面积的62.4%，主要分布在茅山以东的太湖平原和沿江平原地区。该区域耕地地力较好、耕层较厚、土壤重金属含量不高、土壤侵蚀影响较小，是苏南地区现存的优质耕地集中分布地区，应优先划为永久基本农田和高标准农田建设区予以重点保护。积极推行秸秆还田、增施有机肥、少耕免耕、粮豆轮作、农膜减量与回收利用等措施，全面开展耕地质量综合监测，维持良好的耕地地力水平和健康的土壤环境，严格控制非农建设占用，建设苏南地区优质食用农产品生产的核心区。

地力提升区。约 2 360 km<sup>2</sup>, 占苏南地区耕地总面积的 28.8%, 主要分布在茅山以西的南京北部和东南部、镇江中西部和无锡东北部等地区。尽管该区域的耕地环境质量尚好, 但有机质、磷、氮、钾等耕地养分因子含量较低, 部分地区土壤酸性较强, 厥待加强地力建设和土壤性状改善。重点开展耕地土壤养分因子和立地条件的定期监测, 积极推广测土配方施肥, 科学开展秸秆还田, 改善耕层条件, 因地制宜增施酸性土壤改良剂, 加强农业面源污染治理, 改良农业耕作环境。

表 4 耕地保护与整治分区统计

Tab.4 Area Statistic of Different Cultivated Land Reclamation Types

类型	面积(km <sup>2</sup> )	占比(%)
优先保护区域	5 120	62.4
地力提升区域	2 360	28.8
水土保持区域	100	1.2
污染治理与水土保持区	490	6.0
污染治理区域	130	1.6
合计	8 200	100.0



## 图 5 耕地保护与治理分区

Fig.5 Cultivated Land Protection and Reclamation Zoning

污染治理区。约620 km<sup>2</sup>, 占苏南地区耕地总面积的7.6%, 主要分布在西部宁镇沿江平原、太湖以东的苏州北部、中部和南部部分地区。该区域耕地土壤养分较为充足, 但As、Pb、Cu和Hg等重金属元素含量较高, 耕地重金属污染风险较高。严格污染耕地管控措施, 重点开展耕地土壤重金属、有机物污染状况详查, 实施定期监测和评估, 有序开展耕地土壤重金属污染集中修复, 结合地方农业生产习惯试行农作物种植结构调整, 适度减少食用农产品种植, 试行耕地轮作休耕制度, 促进耕地土壤修养生息。

水土保持区。约590 km<sup>2</sup>, 占苏南地区耕地总面积的7.2%, 主要分布太湖以东的苏州北部、中部和南部部分地区, 与污染治理区部分重叠。受制于高强度的农业活动和不完善的水土保持体系, 耕地土壤侵蚀较强, 水肥流失强度较大。需要加强耕地水土流失监测, 积极调整农业灌溉方式、合理调整农业种植模式、适度控制农业开发强度、完善农田水利设施配套, 增强耕地保水保肥能力, 配合秸秆还田、测土配方施肥, 稳定提升耕地综合质量。

## 4 总结与讨论

文章在借鉴已有研究发现的基础上, 结合苏南地区实际, 基于农产品生产能力和质量安全导向, 重构了包括基础地力、健康水平和外部环境的耕地质量评估指标体系, 从区域尺度揭示苏南的耕地质量及限制因素的空间分异, 讨论了分区保护与治理的可行路径。

研究表明: 经过多年的农业耕作以及工业化城镇化发展, “鱼米之乡”的苏南地区耕地规模不断减少的同时, 也面临着一定的质量问题。现存耕地中, 基础地力充沛、健康状况与外部环境较好的优质耕地占比不足65%, 地力条件较差的耕地近30%, 受到水土流失、重金属污染威胁的耕地超过5%。其中, 优质耕地主要分布在茅山以东的太湖水网平原和沿江平原地区, 茅山以西地区耕地地力限制较强, 西部宁镇沿江地区、太湖东北部地区耕地土壤重金属元素含量较高、耕地土壤侵蚀较为严重、水土流失风险较高, 需要因地制宜的开展地力提升、土壤污染修复、水土保持和农业结构调整等治理措施, 以支撑苏南地区农业环境治理体系建设。

与以往的研究相比, 本文证实苏南地区耕地面临着一定重金属污染风险的同时, 还显示苏南地区耕地污染风险在区域尺度上已经较为显著, 同时, 部分优质耕地还面临着水土流失的侵扰。从耕地质量评估方法上看, 本文没有考虑灌溉与排水保障等耕地利用条件<sup>[1, 5]</sup>, 目的在于突出耕地自然质量评价导向; 增加了土壤重金属含量指标以体现耕地健康水平, 但受制于数据获取的难度, 数据采样密度较低(1 km\*1 km)。空间插值虽然可以在一定程度上揭示耕地重金属污染的潜在风险区域, 但是不足以准确刻画小尺度区域的耕地土壤环境质量, 需要利用土壤污染状况详查数据进一步准确评估。在空间插值分析中, 研究在假定满足地统计分析的一般要求前提下, 仅采用球面模型进行半变异分析获取参数, 可能在一定程度上影响空间插值结果可靠性, 需要深入开展半变异分析模型的选择分析。文章仅刻画了土壤重金属环境质量总体状况, 未进行自然背景值的剥离分析, 可能在一定程度上影响了耕地治理措施的针对性, 需要后续研究深入探讨。研究通过三类指数评价、聚类分级和分类组合判定耕地质量类型, 虽然可以一定程度明确耕地质量限制因素, 有助于针对性治理路径的构建, 但指标权重、聚类分级阈值确定依然较为简略, 数据依赖性较强, 需要后续研究深入。另一方面, 已有的研究认为, 冶金、化工等企业尾水的大量排放、污水灌溉是导致耕地污染的主要诱因, 既包括有机物污染、也含有重金属污染<sup>[13, 15, 17]</sup>, 受数据获取约束, 本研究仅关注了耕地土壤重金属污染状况, 耕地质量评估的指标体系仍有待进一步丰富与充实。

## 参考文献:

- 
- [1]高向军, 马仁会. 中国农用土地等级评价研究进展[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 165 - 168.
- [2]DUMANSKI J, PIERI C. Land quality indicators: research plan[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 81(2): 93 - 102.
- [3]刘瑞平, 王洪波, 全芳悦. 自然因素与社会经济因素对耕地质量贡献率研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 289 - 294.
- [4]张凤荣, 郢文聚, 胡存志. 《农用地分等规程》的几个理论问题及应用方向[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 33 - 38.
- [5]石淑芹, 陈佑启, 姚艳敏, 等. 东北地区耕地自然质量和利用质量评价[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 378 - 384.
- [6]唐秀美, 陈百明, 路庆斌, 等. 栅格数据支持下的耕地适宜性评价研究——以山东省章丘市为例[J]. 资源科学, 2009, 31(12): 2164 - 2171.
- [7]路 婕, 李 玲, 吴克宁, 等. 基于农用地分等和土壤环境质量评价的耕地综合质量评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 323 - 329.
- [8] 刘需珈, 吴克宁, 赵华甫. 基于农用地分等与土地质量地球化学评估的耕地质量监测类型研究[J]. 资源科学, 2015, 37(1): 37 - 44.
- [9]李 强, 彭文英, 王建强, 等. 乡镇企业发达区耕地健康评价与驱动机理研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1499 - 1510.
- [10]金 涛, 陆建飞. 江苏省耕地变化与粮食生产地域分化[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(4): 405 - 408.
- [11]李裕瑞, 刘彦随, 龙花楼. 江苏省粮食生产时空变化的影响机制[J]. 地理科学进展, 2009, 28(1): 125 - 131.
- [12]陈 伟, 吴 群. 考虑耕地质量差异影响的江苏省耕地集约利用评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 244 - 253.
- [13]安 琼, 董元华, 王 辉, 等. 苏南农田土壤有机氯农药残留规律[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 414 - 419.
- [14]佴 军, 张洪程, 陆建飞. 江苏省水稻生产30年地域格局变化及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3446 - 3452.
- [15]李小曼, 刘 勤, 徐梦洁, 等. 苏南村镇土壤重金属空间变异性研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 179 - 185.
- [16]谢 飞, 吴俊峰, 任晓鸣. 江苏省典型工业开发区土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 387 - 391.
- [17]张利飞, 杨文龙, 董 亮, 等. 苏南地区农田表层土壤中多环芳烃和酞酸酯的污染特征及来源[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2202 - 2209.
- [18]曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

- 
- [19] 吴叶, 王冬月, 孙宏, 等. 苏南农村地区土壤、大米和井水重金属污染现状[J]. 现代预防医学, 2016, 43(6): 991 - 993, 1004.
- [20] 宋戈, 李丹, 梁海鸥, 等. 松嫩高平原黑土区耕地质量特征及其空间分异——以黑龙江省巴彦县为例[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 129 - 134.
- [21] CHEN T B, ZHENG Y M, LEI M, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China[J]. Chemosphere, 2005, 60(4): 542 - 551.
- [22] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[R]. USDA, Agriculture Handbook. No. 537, 1978.
- [23] 张岩, 刘宪春, 李智广, 等. 利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 165 - 171.
- [24] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 176 - 183.
- [25] 王琪琪, 濮励杰, 朱明, 等. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究——以江苏省如东县为例[J]. 地理科学, 2016, 36(2): 256 - 264.
- [26] 陈诚. 沿海岸线资源综合适宜性评价研究——以宁波市为例[J]. 资源科学, 2013, 35(5): 950 - 957.
- [27] 孙伟, 陈诚. 海岸带的空间功能分区与管制方法——以宁波市为例[J]. 地理研究, 2013, 32(10): 1878 - 1889.