

基于 GIS 技术的耕地有效磷富集与生态风险评价 ——以福建省泰宁县为例

张 瑜¹, 张黎明^{1,2}, 周碧青^{1,2}, 沈金泉³, 徐福祥¹, 邢世和^{1,2*}

(1.福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2.土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福州 350002; 3.福建省农田建设与土壤肥料技术总站, 福州 350003)

摘 要:为了探讨丘陵山地区耕地土壤有效磷的富集特征及其生态风险,利用南方丘陵山地区——福建省泰宁县 1982 年 6069 个和 2008 年 2221 个样点实测数据建立的 1:5 万耕地利用-土壤类型及属性数据库,借助 GIS 与数学模型集成技术,研究分析了区域耕地不同土壤类型和利用类型有效磷富集状况、生态风险及其空间分异特征。研究结果表明,26 年来泰宁县耕地土壤有效磷富集作用明显,有效磷含量平均提高 $24.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量极丰富、丰富等级的耕地面积显著增加,含量中等及以下的面积大幅下降。水稻土土类、潜育水稻土亚类的有效磷富集最明显,紫色土土类、酸性紫色土亚类有效磷富集作用较弱;望天田有效磷富集率最大,菜地有效磷富集率最小。泰宁县存在磷素富集生态风险的耕地面积占全县耕地总面积的 31.89%,以中风险区面积最大;水稻土土类、渗育水稻土亚类存在磷素富集生态风险的面积最大。

关键词:丘陵山地;耕地;有效磷;富集作用;生态风险

中图分类号:S158.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)02-0326-11 doi:10.11654/jaes.2015.02.017

Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Farmland Soils by GIS Technology —— A Case Study of Taining County in Fujian

ZHANG Yu¹, ZHANG Li-ming^{1,2}, ZHOU Bi-qing^{1,2}, SHEN Jin-quan³, XU Fu-xiang¹, XING Shi-he^{1,2*}

(1.College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2.University Key Lab of Soil Ecosystem Health and Regulation in Fujian, Fuzhou 350002, China; 3.Fujian Cropland Construction and Soil Fertilizer Station, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Assessing enrichment characteristics and ecological risk of available phosphorus in farmland soils is of great significance for rational fertilization and environmental protection. Here a case study was conducted in Taining County, a mountain-hilly region in Northwest Fujian Province, to investigate the enrichment level, ecological risk and spatial distribution of available phosphorus in different types of soil under different land utilizations by using 1:50 000 land use-soil type database based on the field investigation data at 6069 sampling sites in 1982 and 2221 sampling sites in 2008, and by combining geographical information system with mathematic models. Available phosphorus of farmland soils was enriched significantly in Taining from 1982 to 2008, with the average value being increased by $24.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the mean annual growth rate of $0.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. In general, the enrichment of available phosphorus in paddy soils was highest, with an average enrichment rate of 1.93, while that in purplish soils was lowest, with an average enrichment rate of 1.14. However, the greatest enrichment rate of available phosphorus was found in rainfed paddy field, with the enrichment rate of 2.08, whereas the lowest enrichment rate in vegetable land, with the enrichment rate of 0.69. The 31.89% of the county's total farmland soils had the ecological risk of phosphorus. These results indicate the necessity to draw up proper fertilization regime according to the enrichment level and ecological risk of soil available phosphorus in different soil types and different land utilizations.

Keywords: mountain-hilly region; farmland; available phosphorus; enrichment; ecological risk

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家自然科学基金(41001126);福建省高校杰出青年科研人才计划基金(JA13093);福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(JA14097)

作者简介:张 瑜(1990—),女,黑龙江尚志人,硕士研究生,从事土壤氮磷环境效应研究。E-mail:tysyzyangyu@163.com

* 通信作者:邢世和 E-mail:fafuxsh@126.com

磷是植物生长发育不可缺少的营养元素之一,植物吸收的磷素主要来自土壤,然而土壤中总磷含量只有 0.02%~0.2%,与其他大量营养元素相比较低。有效磷是土壤磷贮库中对作物最为有效的部分,能供作物直接吸收利用,可作为评价土壤供磷能力的一项重要指标^[1]。随着土地利用强度的提高,为保证农产品的品质和产量,农业生产中广泛施用磷肥,但磷肥的当季利用率低,且磷素在土壤中的移动性相对较弱,长期施肥导致磷在土壤中大量积累,也会加大土壤磷素向水体流失的风险,产生潜在的环境问题^[2]。因此,开展区域耕地土壤有效磷富集特征及其生态风险评价研究,可为合理施肥和防控环境风险提供科学依据。

国内外对土壤磷素富集的研究主要集中在不同土地利用方式、田间管理、养分不同形态和颗粒组成等情况下土壤磷素富集率的差异及其原因^[3-7],以及富集率估算方法的优化^[8]方面,较少采用 GIS 与数学模型集成技术从不同时期耕地土壤有效磷富集变化角度研究区域土壤磷素富集状况及其生态风险。我国南方丘陵山地区地形复杂,坡度较大,降雨量大且集中,长期持续大量施用磷肥可能导致耕地土壤磷素大量富集,磷素淋失风险增大,从而引起流域水体富营养化等环境问题。本研究以福建省西北部的丘陵山地区泰宁县为研究区,基于 GIS 与数学模型集成技术,利用 1982 年 6 069 个和 2008 年 2 221 个调查样点数据建立的 1:50 000 耕地利用-土壤类型及属性数据库,探讨近 30 年来该县域耕地土壤有效磷的富集特征,评价研究区耕地磷素富集的生态风险,为丘陵山地区耕地土壤科学施用磷肥和环境风险防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泰宁县位于福建省西北部,东经 116°53′~117°24′,北纬 26°34′~27°08′,土地总面积 1 528.81 km²,属中亚热带季风气候,年均气温 17℃,年均降水量 1 775 mm,无霜期 255 d,年均日照时数 1 805 h。地貌类型主要有山地(>500 m)和丘陵(200~500 m)。研究区耕地总面积 12 855.43 hm²,耕地土壤类型主要有红壤、黄壤、水稻土和紫色土,其中以水稻土面积最大,占耕地总面积的 82.77%,成土母质一般为坡积物、残积物和冲积物母质,其地理位置和地貌类型分布见图 1 和图 2。

1.2 基础资料收集

泰宁县 1:50 000 土壤图、1:50 000 土地利用现状



图 1 泰宁县地理位置图

Figure 1 Geographical location of Taining County

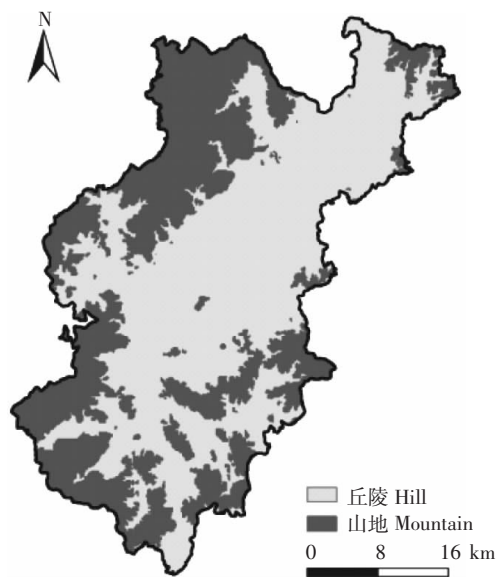


图 2 泰宁县地貌类型分布图

Figure 2 Landform map of Taining County

图数据库来自农业部测土配方施肥项目;1982 年土壤调查样点分析数据来自于泰宁县第二次土壤普查样品分析的纸质记录资料;2008 年土壤调查样点分析数据来自农业部测土配方施肥项目样点分析资料;磷肥施用量等基础数据资料来自泰宁县历年统计年鉴。

1.3 耕地土地利用方式-土壤类型数据库的建立

借助 ArcGIS 9.3 软件,从 2008 年 1:50 000 土地利用现状图数据库中提取耕地图斑矢量图层,将福建省第二次土壤普查 1:50 000 土壤类型矢量图层与耕

地利用现状矢量图层进行局部配准,转绘耕地图斑的土壤类型信息,建立泰宁县耕地 1:50 000 土地利用-土壤类型空间数据库,全县耕地土壤类型归属 5 个土类、8 个亚类、23 个土属和 28 个土种。属性数据库包括 1982 年和 2008 年耕地土壤调查样点数据,其中:1982 年耕地土壤调查样点数据库是利用第二次土壤普查样点分布图以及样点相关属性分析数据建立,样点数为 6069 个;2008 年耕地土壤样点数据库是直接利用调查样点的 GPS 经纬度坐标以及样点相关属性分析数据建立,样点数为 2221 个。土壤属性主要包括有机质、氮、磷、钾、机械组成等理化性质指标(图 3)。

1.4 耕地土壤有效磷富集程度及生态风险评价

为比较两期耕地土壤有效磷富集的差异,本研究采用富集率(ER)来衡量不同土壤类型和土地利用方式下磷素富集水平的高低,公式如下^[9]:

$$ER=(X_s-X_0)/X_0$$

式中: X_s 为 2008 年某土壤类型或土地利用类型有效磷含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; X_0 为 1982 年某土壤类型或土地利用类型有效磷含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

本研究采用相对风险系数评价耕地土壤磷素富集生态风险程度的高低:

相对风险系数=(有效磷实测值-有效磷生态风险临界值)/有效磷生态风险临界值

由于泰宁县属于亚热带湿润季风气候带的南方红壤区,且福建省至今有关水田、旱地土壤有效磷

生态风险临界值研究尚少见报道,仅见章明清等^[9]研究认为福建省菜地土壤有效磷的临界值为 $42.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,故上式中土壤有效磷生态风险临界值参考鲁如坤等^[10]在相同气候带的我国南方红壤区土壤磷素积累状况的较全面研究结果,其中旱地土壤有效磷生态风险临界值为 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,水田(灌溉水田、望天田、菜地)土壤有效磷生态风险临界值为 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。借助 GIS 软件计算各耕地图斑 2008 年土壤磷素富集相对风险系数,并运用 SPSS 软件中的动态聚类分析模型对相对风险系数的大小及其差异规律进行自动分区,根据相对风险系数自动分区值的范围大小将泰宁县耕地土壤磷素富集生态风险划分为生态高风险区(相对风险系数为 $0.489\sim1.150$)、中风险区(相对风险系数为 $0.150\sim0.125$)和低风险区(相对风险系数为 $0.125\sim0$)。

1.5 数据统计分析

采用统计分析软件 SPSS 19.0 进行数据常规统计分析、相关性分析和 t 检验分析。

2 结果与讨论

2.1 耕地土壤有效磷空间变异性分析

利用 GS+9.0 软件对土壤有效磷进行半方差分析和插值模型的选择,经对数转换后,数据符合正态分布,半方差分析结果见表 1 和图 4。泰宁县不同时期耕地土壤有效磷含量均符合指数模型,各模型决定系

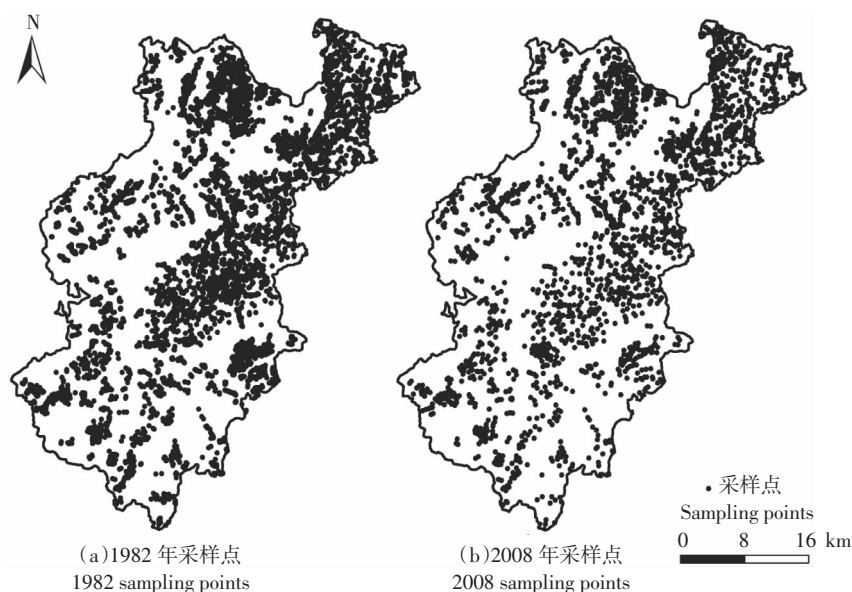


图 3 不同时期耕地土壤样点分布图

Figure 3 Distribution of sampling points in farmland soil during different periods

数的 F 检验均为极显著水平($P<0.01$),实验半方差函数与理论模型的拟合程度较好,且两期有效磷的块金系数 $[(C_0/C_0+C)]<25\%$,说明它们在变程内具有强烈的空间相关性^[1],模型能较好地反应土壤有效磷的空间结构。变异函数满足内蕴平稳假设,利用 ArcGIS 软件 Geostatistical Analyst 模块的普通克里格插值模型分别对 1982 年和 2008 年耕地土壤有效磷进行 Kring 插值,建立耕地土壤有效磷空间分布图。

2.2 耕地土壤有效磷富集的总体特征分析

由表 2 分析结果可以看出,1982 年泰宁县耕地土壤调查样点有效磷含量均值为 $13.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而 2008 年有效磷含量均值较 1982 年平均增加 $23.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明 26 年来全县耕地土壤调查样点有效磷含量显著提高。1982 年耕地土壤调查样点有效磷变异系数为 135.24% ,属强烈变异,而 2008 年有效磷变异系数仅为 87.60% ,比 1982 年降低了 47.63% ,表明 2008 年泰宁县耕地土壤有效磷的空间差异性显著下降。

耕地土壤有效磷含量空间插值结果表明(表 3),

26 年来泰宁县近 99%的耕地土壤有效磷含量不同程度增加,呈现较明显的富集趋势。1982 年全县耕地土壤有效磷含量均值为 $12.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,2008 年为 $37.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 1982 年增加了 $24.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均富集率达 1.89。按全国第二次土壤普查有效磷含量的分级标准统计^[12],2008 年泰宁县耕地土壤有效磷含量分级面积较 1982 年发生明显变化(表 3 和图 5),其中 2008 年耕地土壤有效磷含量极丰富和丰富等级的面积显著增加,分别比 1982 年增加 36.30% 和 45.53% ;中上和 中下等级的面积则大幅下降, 分别比 1982 年减少 43.77% 和 35.28% 。耕地土壤有效磷含量增幅较大,主要有新桥、开善、下渠和杉城等乡镇,这些乡镇均以农业为主产业。区域耕地土壤有效磷含量及其空间差异性的变化主要与磷肥投入量以及影响磷素有效性因素的变化密切相关。根据泰宁县统计年鉴资料,1982 年前,由于磷肥资源较为短缺,泰宁县磷肥施用量相对较低,1971—1982 年磷肥施用量均值仅为 $240\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,故该时期全县多数耕地土壤有效磷含量普遍较低,有效磷中上和 中下等级面积所占比例较高,且由

表 1 不同时期耕地土壤有效磷半方差函数模型及参数

Table 1 Semivariance model and its parameters of available phosphorus in farmland soils in different years

年份 Year	最优模型 Optimal model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 Range/m	决定系数 r^2	残差 RSS	基台效应 $C_0/(C_0+C)$
1982	指数模型 Exponential model	0.16	1.16	2 340.00	0.36**	0.05	13.41%
2008	指数模型 Exponential model	0.08	0.67	2 160.00	0.51**	0.01	11.43%

Note: ** $P<0.01$.

表 2 不同时期泰宁县耕地土壤样点有效磷的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of available phosphorus in farmland soil in different years

年份 Year	样点数/个 Number of sample	耕地土壤有效磷 Soil available phosphorus				
		极小值 Min/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	极大值 Max/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	均值 Mean/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 SD/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 CV/%
1982	6069	0.40	325.00	13.22	17.88	135.24
2008	2221	1.40	254.78	36.50	31.98	87.60

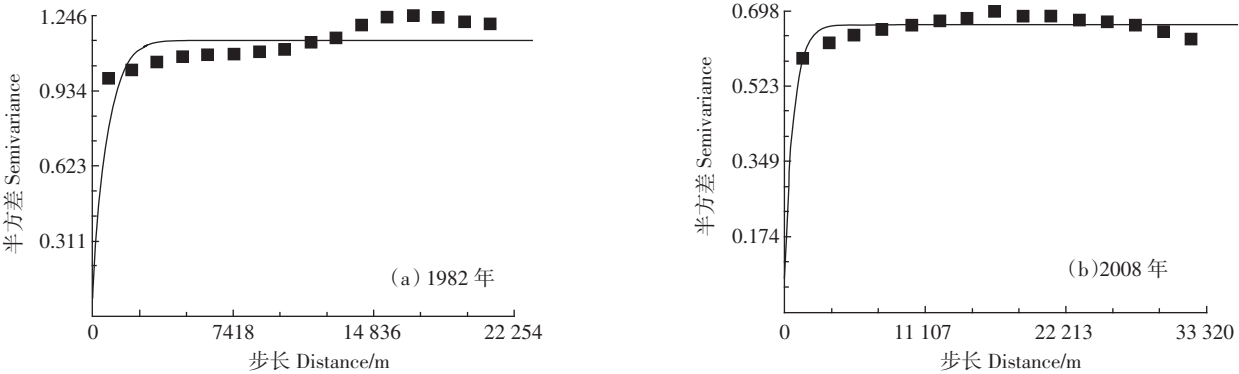


图 4 1982 年和 2008 年耕地土壤有效磷含量的半方差图

Figure 4 Semivariograms of soil available phosphorus in 1982 and 2008

表 3 不同时期耕地土壤有效磷丰缺等级面积
Table 3 Area of enrichment levels of available phosphorus in farmland soil in different years

丰缺状况 Enrichment level	有效磷分级标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Grading criteria of available phosphorus	有效磷均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Mean of available phosphorus		占耕地面积/% Percent of the total arable area	
		1982	2008	1982	2008
极丰富	>40	45.10	49.36	1.11	37.41
丰富	20~40	25.25	30.85	13.09	58.62
中上	10~20	13.96	17.86	47.74	3.97
中下	5~10	7.69	—	35.28	—
缺乏	3~5	4.48	—	2.78	—
极缺乏	<3	—	—	—	—

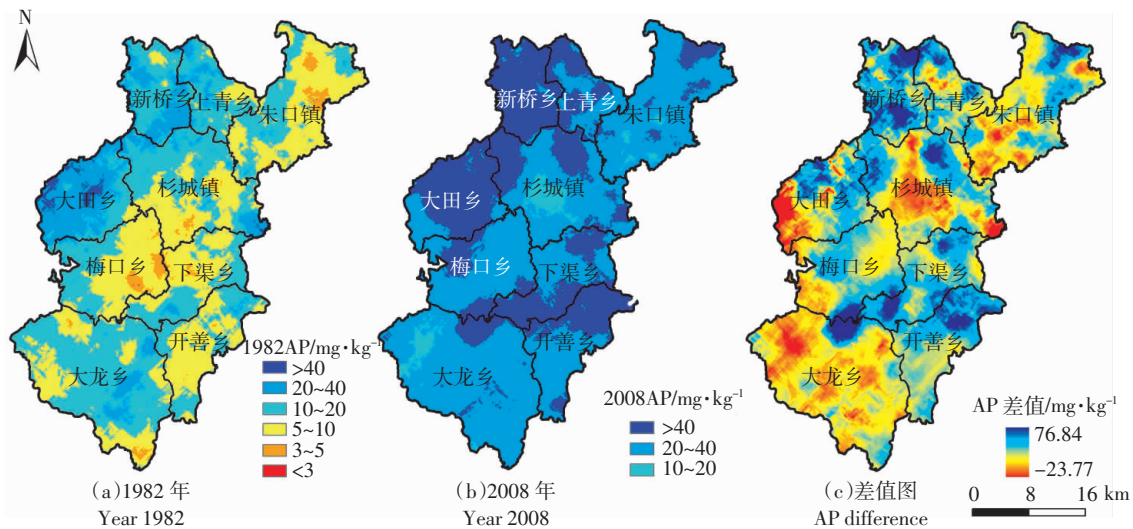


图 5 不同时期耕地土壤有效磷空间分布图及有效磷含量差值图

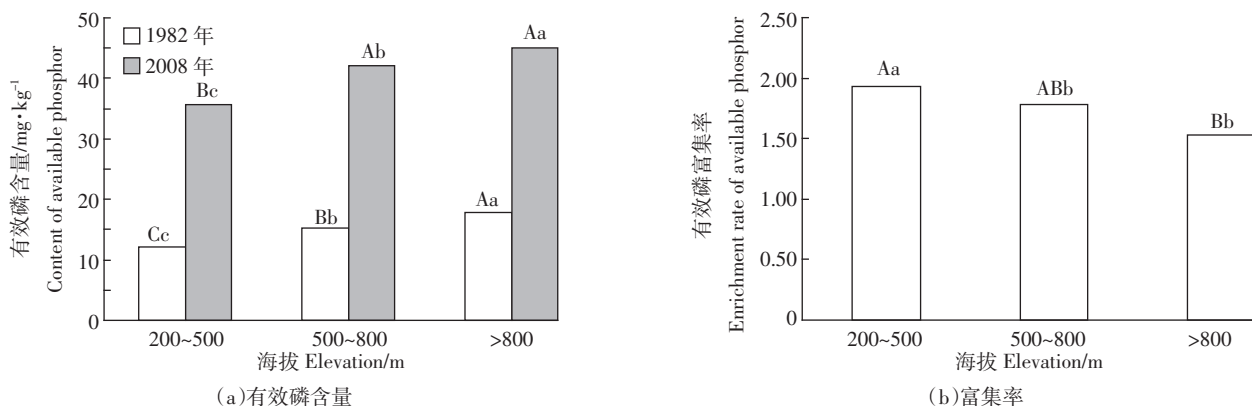
Figure 5 Spatial distribution and difference map of available phosphorus in farmland soil in different years

于区域母质等差异的影响致使耕地土壤有效磷的空间差异较为显著;改革开放以来,随着农业生产的发展,泰宁县磷肥施用量明显提高,2003—2008 年磷肥施用量均值高达 $738.83\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 是 1971—1982 年年均磷肥施用量的 3 倍 (据泰宁县统计年鉴,1971—2008), 长期持续大量施用磷肥导致全县耕地土壤磷素含量普遍提升, 耕地土壤有效磷含量趋于均一, 有效磷的空间差异性显著减小。土壤磷素有效性受土壤 pH、有机质、铁铝氧化物、质地、干湿交替状况和微生物活性等因素的影响^[13], 国内外研究表明施用有机肥既可以活化土壤本身的无效磷, 又可以促进磷的解吸, 提高土壤磷的有效性^[14-15], 土壤中有机质一般与有效磷含量呈显著正相关。这是由于腐植酸及其矿化过程产生的有机酸络合和酸溶作用, 减少了土壤矿物质对磷的固定作用, 并促进土壤磷素的活化^[16]。

利用 2008 年泰宁县有机质含量与有效磷含量进行相关性分析, 结果表明泰宁县耕地土壤有效磷与有

机质含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 1982 年泰宁县耕地土壤有机质含量均值为 $25.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 2008 年则达 $30.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有机质含量整体有所提升。因此, 农业生产上肥料 (尤其是磷肥) 投入的显著增加以及土壤有机质含量提高促进磷素的有效化是导致泰宁县耕地土壤有效磷明显富集、有效磷含量空间差异性减少的主要因素。

不同海拔耕地土壤有效磷含量方差分析表明 (图 6a), 泰宁县不同海拔间耕地有效磷含量存在显著差异。1982 年和 2008 年耕地土壤有效磷含量均随海拔升高而增加, 有效磷含量与海拔呈极显著正相关 ($r_{1982}=0.265^{**}$, $r_{2008}=0.324^{**}$)。这与龙胜碧等^[17]的研究结果一致, 其原因主要是由于海拔升高气温下降, 土壤微生物活性减弱, 致使有机质分解缓慢, 有利于有机质的积累, 而土壤有机质含量与有效磷含量呈显著正相关^[18]。从不同海拔耕地土壤有效磷富集率的方差分析结果来看 (图 6b), 200~500 m 与 800 m 海拔间耕



柱上不同大写字母表示 $P=0.01$ 水平的显著差异,不同小写字母表示 $P=0.05$ 水平的显著差异

Different capital(lowercase) letters above bars mean difference at $P=0.01(P=0.05)$ level by Duncan's multiple range test

图 6 不同海拔之间耕地土壤有效磷含量及富集率

Figure 6 Contents and enrichment rates of available phosphorus in farmland soil at different elevation

地土壤有效磷富集率呈极显著差异,200~500 m 与 500~800 m 和 800 m 间的差异也达到显著水平。总体上看,泰宁县耕地土壤有效磷富集率随海拔的升高而减小。这主要是由于泰宁县海拔介于 200~500 m 之间的耕地面积占全县耕地总面积的 77.13%,表明该海拔范围区域是全县的农业主产区,磷肥和有机肥施用量较大导致有效磷富集率较高,而海拔 800 m 以上的耕地仅占 1.70%,由于交通不便且为一熟制栽培,磷肥施用量少导致耕地有效磷富集率较低^[19]。

2.3 不同土壤类型和利用方式耕地有效磷富集特征分析

2.3.1 耕地不同土类有效磷富集特征

由表 4 结果可以看出,1982 年泰宁县耕地各土类有效磷含量均值介于 12.69~14.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,2008 年各土类有效磷含量均值明显提高,介于 31.30~37.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,其中红壤、黄壤和水稻土土类的有效磷含量增加较为显著,分别比 1982 年相应土类有效磷均值提高 23.43、23.92、24.50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。1982 年和 2008 年不同土壤类型耕地有效磷均值 t 检验结果

表明,红壤、水稻土、紫色土和黄壤两期有效磷均值呈极显著差异($P<0.01$)。

从不同土类有效磷富集率来看(表 4),水稻土有效磷富集率最高,紫色土有效磷富集率最低,表明水稻土的有效磷富集作用更为显著。其原因在于:(1)水稻土是经人为水耕熟化发育而成的耕作土壤,土壤熟化度和有机质含量相对较高,1982 年和 2008 年该土类有机质含量均值分别达 25.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 30.75 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,对提高土壤磷素有效性具有一定作用;(2)由于淹水条件发展起来的还原条件,使水田磷的有效性显著提高^[20];(3)淹水条件使酸性水稻土的 pH 升高,而红壤性水稻土对磷的固定作用随 pH 增加而减少,故有利于提高水稻土的有效磷含量^[21];(4)水稻土的利用强度较其他土类高,致使磷肥施用量也相对较多,故其有效磷富集率高。紫色土有效磷富集率低是因为该土类属初育土纲,发育度相对较低,且土壤通气良好致使有机质不易积累,1982 年和 2008 年该土类的有机质含量均值仅分别为水稻土的 82.95%和 90.33%;且泰宁县紫色土所处地形丘陵起伏,土壤侵蚀作用较

表 4 耕地不同土类有效磷含量及富集率

Table 4 Contents and enrichment rates of available phosphorus in farmland soils of different soil groups

土类 Soil group	样本数 No. of sample	1982 年有效磷含量 Content of available phosphorus in 1982/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		2008 年有效磷含量 Content of available phosphorus in 2008/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		富集率 Enrichment rate
		均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD	
红壤 Red earths	365	14.18Aa	7.46	37.61Bb	12.30	1.65
黄壤 Yellow earths	6	13.36Aa	3.86	37.28Bb	15.38	1.79
水稻土 Paddy soils	2645	12.69Aa	6.75	37.19Bb	11.35	1.93
紫色土 Purplish soils	21	14.65Aa	4.81	31.30Bb	4.58	1.14

注:同一行内均值之后的不同大写字母(小写字母)表示达 $P=0.01(P=0.05)$ 水平的显著性差异。

Note: Means followed by different capital(lowercase) letters in each column are significantly different at $P=0.01(P=0.05)$ level.

强,致使有效磷易于流失,加上该土类利用强度较低,磷肥施用量也相对较低,导致紫色土有效磷富集率较明显低于其他土类。

2.3.2 耕地不同利用方式有效磷富集特征

土地利用方式对耕地土壤有效磷的富集作用具有重要影响。泰宁县的耕地利用方式主要分为灌溉水田、旱地、望天田和菜地。由表 5 可以看出,1982 年不同耕地利用方式土壤有效磷含量均值为菜地(14.61 mg·kg⁻¹)>旱地(13.26 mg·kg⁻¹)>灌溉水田(12.88 mg·kg⁻¹)>望天田(10.92 mg·kg⁻¹)。这与秦胜金等^[22]对闽江流域不同土地利用方式下土壤磷含量的研究基本一致,其主要原因是 1982 年之前由于磷肥资源短缺,泰宁县磷肥施用水平总体不高,但农业生产上较重视有机肥的施用,而菜地由于分布区位优势,致使菜地的有机肥施用量一般高于其他耕地利用方式,导致菜地土壤的有效磷含量相对较高。2008 年耕地不同利用类型土壤有效磷含量均值则为灌溉水田(37.35 mg·kg⁻¹)>望天田(33.68 mg·kg⁻¹)>旱地(33.57 mg·kg⁻¹)>菜地(24.67 mg·kg⁻¹),这主要是由于改革开放以来,随着农业生产的发展以及种植制度的变化,泰宁县农业生产的施肥结构发生改变,水田土壤磷肥施用量大幅增加,而且随着沃土工程的实施,水田土壤有机肥施用量也明显增加,致使灌溉水田的有效磷含量大幅增加;而菜地的化肥投入主要以氮肥为主^[23],化学磷肥的施用量低于灌溉水田,致使该时期菜地土壤有效磷含量明显低于其他土类。

不同利用方式耕地两期有效磷均值 *t* 检验结果表明,泰宁县两期不同土地利用方式耕地的有效磷均值也呈极显著差异($P<0.01$),其中灌溉水田有效磷均值增加量最大,高达 24.47 mg·kg⁻¹;而后依次为望天田、旱地和菜地,分别为 22.76、20.31、10.06 mg·kg⁻¹。从不同利用方式土壤有效磷富集率来看,望天田和灌溉水田有效磷富集率较高,分别为 2.08 和 1.90,菜地

有效磷富集率最低,仅为 0.69。望天田和灌溉水田有效磷富集率较高主要与泰宁县旱季种植烟叶有关,烟叶生产过程大量投入磷肥和有机肥,导致土壤有效磷富集明显^[24];此外,随着沃土工程的实施,水田秸秆还田和种植绿肥等增施有机肥措施也致使近年来泰宁县水田土壤有机质含量普遍上升,据泰宁县统计年鉴资料,2008 年冬种紫云英面积达 635.2 hm²,是 1980 年 25.33 hm² 的 26 倍,这也在一定程度上提高了有效磷的含量,且促进水田土壤磷素的有效化。有研究表明,长期施用绿肥等有机肥可以增加土壤腐殖质含量,减少土壤磷素固定作用,提高土壤磷的有效性^[25]。

2.4 耕地土壤磷素富集生态风险评价

2.4.1 耕地土壤磷素富集生态风险总体分析

农业面源磷污染是引起水体环境恶化的关键因素之一,上述研究结果表明,自 20 世纪 80 年代以来,泰宁县耕地土壤有效磷富集作用明显(图 7),可能增加土壤磷素向水体流失的风险。耕地土壤磷素生态风险评价结果表明(表 6,图 8),2008 年泰宁县存在磷

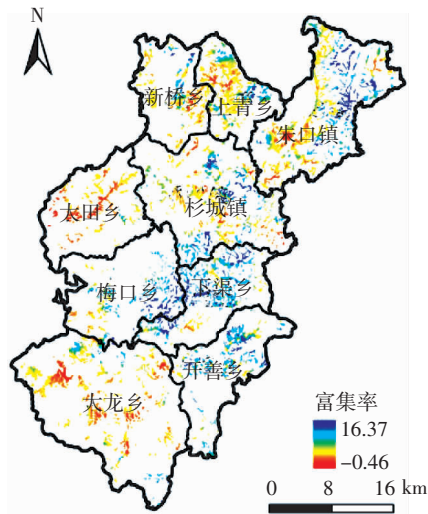


图 7 泰宁县耕地土壤有效磷富集率分布图
Figure 7 Distribution map of available phosphorus enrichment rates of farmland soils in Taiping

表 5 耕地不同利用方式土壤有效磷含量及富集率

Table 5 Contents and enrichment rates of available phosphorus in farmland soils of different land use types

土地利用方式 Land utilization	样本数 No. of Sample	1982 年有效磷含量 Content of available phosphorus in 1982/mg·kg ⁻¹		2008 年有效磷含量 Content of available phosphorus in 2008/mg·kg ⁻¹		富集率 Enrichment rate
		均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD	
灌溉水田 Irrigated paddy	2918	12.88Aa	6.86	37.35Bb	11.47	1.90
望天田 Rainfed paddy	15	10.92Aa	6.77	33.68Bb	11.85	2.08
旱地 Dry land	98	13.26Aa	6.40	33.57Bb	10.10	1.53
菜地 Vegetable land	6	14.61Aa	1.71	24.67Bb	1.77	0.69

注:同一行内均值之后的不同大写字母(小写字母)表示达 $P=0.01$ ($P=0.05$)水平的显著性差异。
Note: Means followed by different capital(lowercase) letters in each column are significantly different at $P=0.01$ ($P=0.05$) level.

表 6 泰宁县耕地土壤有效磷富集生态风险区面积(hm²)

Table 6 Area of ecological risk zones of available phosphorus enrichment of farmland soils in Taining

乡镇 Villages and towns	高风险区 High risk zone	中风险区 Mid risk zone	低风险区 Low risk zone
大龙乡	21.49	10.84	66.96
大田乡	182.36	347.92	113.23
开善乡	22.95	360.90	124.03
梅口乡	—	94.18	124.41
杉城镇	75.11	258.22	151.56
上青乡	16.46	283.25	285.86
下渠乡	—	315.61	294.16
新桥乡	139.44	360.61	202.26
朱口镇	1.97	66.53	179.01

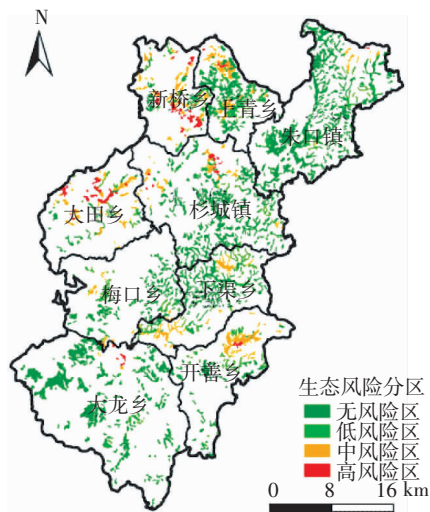


图 8 泰宁县耕地土壤磷素富集生态风险分区图

Figure 8 Ecological risk zoning map of available phosphorus enrichment in farmland soils in Taining

素富集生态风险的耕地面积合计 4 099.32 hm², 占全县耕地总面积的 31.89%, 主要分布在新桥、下渠、大田、上青和开善等乡镇。磷素富集高生态风险区耕地面积达 459.78 hm², 分别占全县耕地和存在磷素富集生态风险耕地面积的 3.58% 和 11.22%, 主要分布在大田和新桥乡; 中风险区耕地面积为 2 098.07 hm², 占全县耕地和存在磷素富集生态风险耕地面积的 16.02% 和 50.25%, 主要分布于新桥、开善、大田和下渠等乡; 低风险区耕地面积为 1 541.47 hm², 分别占全县耕地和存在磷素富集生态风险耕地面积的 11.31% 和 35.46%, 主要分布在上青和下渠乡。可见, 泰宁县以农业为主产业的大田、新桥、开善和下渠等乡耕地土壤磷素富集的生态风险较高。总的来说, 泰宁县近

1/3 的耕地土壤存在磷素富集生态风险, 其生态风险的高低不仅与不同土地利用类型和种植制度下的田间施肥管理所致有效磷含量高低直接相关, 而且与不同土壤类型性质和地面坡度差异等所致的磷素流失程度不同密切相关。

2.4.2 不同土类耕地磷素富集生态风险分析

从不同土类耕地土壤磷素富集生态风险分区面积统计来看(图 9a), 2008 年泰宁县水稻土存在磷素富集生态风险的耕地面积高达 3 973.46 hm², 分别占全县耕地和存在生态风险耕地面积的 30.91% 和 96.93%, 高、中、低生态风险区面积分别为 459.78、2 059.98、1 453.71 hm², 分别占水稻土存在磷素生态风险耕地面积的 11.57%、51.84% 和 36.59%; 红壤存在磷素富集生态风险的耕地面积为 125.86 hm², 分别占全县耕地和存在生态风险耕地面积的 0.98% 和 3.07%, 中、低生态风险区面积分别为 38.09、87.77 hm², 分别占红壤存在磷素生态风险耕地面积的 30.26% 和 69.74%; 其他土类耕地不存在磷素富集生态风险。可见, 泰宁县存在耕地磷素富集生态风险的土类主要是水稻土, 一方面由于水稻土是泰宁县主要耕地土壤类型, 占全县耕地总面积的 82.77%, 另一方面土壤磷素流失风险与施肥量呈显著正相关, 随着农业生产规模的不断扩大, 长期以来水稻土的磷肥施用量一直处于较高水平, 增加了水稻土磷素的流失风险^[26], 加上淹水条件及较高的有机质含量等条件导致磷素的有效性相对较高, 致使其淋失的生态风险也相对较高。红壤作为旱地土壤类型, 磷肥施用量通常低于水田土壤^[27], 加上其 pH 值和有机质含量相对较低, 磷素固定作用较强^[27], 致使其磷素的有效性和富集作用相对较弱, 故磷素流失的生态风险也相对较低。

2.4.3 不同利用方式耕地磷素富集生态风险分析

从不同利用方式耕地土壤磷素富集生态风险分区面积统计来看(图 9b), 2008 年泰宁县耕地存在磷素富集生态风险的土地利用方式有旱地、望天田和灌溉水田, 均以中风险为主, 其中灌溉水田存在磷素富集生态风险的面积最大, 为 4 032.57 hm², 占耕地总面积的 31.37%, 望天田和旱地存在磷素富集生态风险的面积较小, 分别为 13.76、52.98 hm², 仅占耕地总面积的 0.41% 和 0.11%。这一方面是由于灌溉水田是泰宁县主要的土地利用类型, 占耕地总面积的 94.97%, 在农业生产中这些灌溉水田不仅磷肥施用量较高, 而且多为分布于丘陵山地区的坡耕地, 其坡面坡度介于 0°~29.40°, 平均坡度达 6.88°, 从而增加了灌溉水田磷

素向水体流失的风险;另一方面是由于种植制度对地表磷素的流失量有较大影响,烟-稻轮作是泰宁县灌溉水田的主要种植制度,水旱轮作更易发生土壤磷流失^[28]。

2.4.4 不同坡度耕地磷素富集生态风险分析

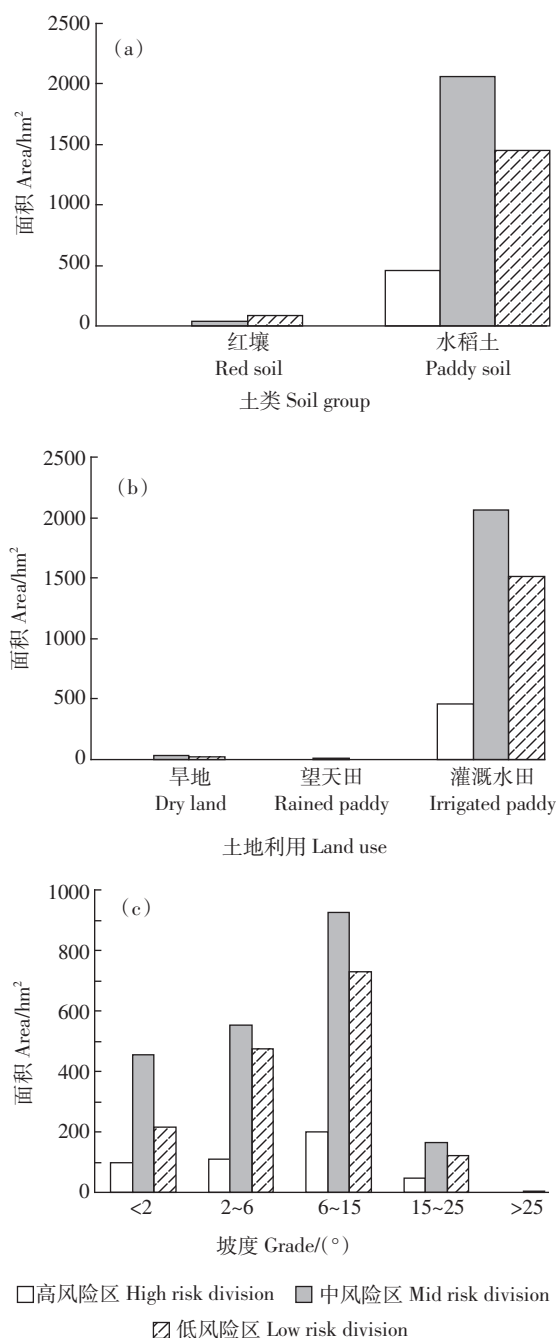


图9 不同土、土地利用方式和坡度耕地土壤磷素富集生态风险分区面积

Figure 9 Area of ecological risk zones of available phosphorus enrichment in farmland soils of different soil groups, land utilizations and slopes

从不同坡度耕地土壤磷素富集生态风险分区面积统计来看(图9c),在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 坡度范围内,2008年泰宁县耕地磷素富集生态风险面积随坡度的增大而增加,其中以 $2^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 坡度范围的耕地磷素富集生态风险面积较大,合计面积达 $2\,989.49\text{ hm}^2$,占全县存在磷素富集生态风险耕地总面积的72.93%。这主要与坡度对耕地土壤磷素流失的影响程度密切相关。农田土壤中磷进入地表和地下水体的途径主要有地表径流、侵蚀和淋溶等三种^[29],其中地表径流和土壤侵蚀是磷流失的主要途径。泰宁县地处亚热带湿润气候区,降雨量多、降雨强度大,易发生地表径流和土壤侵蚀。有研究表明,土壤磷流失与地面坡度显著相关,坡度影响农田土壤径流中磷的流失量,坡度增大,径流中磷的流失量呈增大趋势,地面坡度为 $6^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 的径流中磷流失急剧增大, 12° 以后磷流失量增加减缓^[30-31]。泰宁县地形坡度 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 、 $6^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的耕地面积合计占全县耕地总面积的70.43%,故坡耕地在一定程度上加大了磷素的流失风险。

3 结论

(1)研究区耕地土壤有效磷富集作用十分明显,1982—2008年间泰宁县耕地土壤有效磷含量显著增加,空间差异性显著下降。2008年全县耕地土壤有效磷含量极丰富和丰富的面积大幅增加,而有效磷中上和中下的面积则大幅降低。不同土壤类型和利用方式下耕地有效磷富集作用差异较明显,水稻土土类的有效磷富集率最高,望天田利用类型的有效磷富集率最大。

(2)2008年研究区耕地存在磷素富集生态风险以中风险为主,水稻土土类的磷素富集生态风险最高。施肥结构变化(包括肥料种类及其施用量)、淹水状况和有机质含量提升等是引起研究区耕地土壤有效磷富集和生态风险增大的主因。水田利用方式下的耕地土壤有效磷流失生态风险较大,应引起高度重视。

(3)利用不同时期区域耕地土壤调查样点分析数据,采用GIS与数学模型集成技术,能够从空间尺度上科学地揭示区域耕地土壤有效磷富集状况、生态风险高低及其分布规律,实现区域耕地土壤磷素富集与生态风险评价的空间细化,对开展耕地土壤磷素生态风险和面源污染的分区调控具有应用价值。由于本研究区土壤及地理条件等与鲁如坤的研究区可能存在差异,对完全适用于本研究区耕地土壤磷素富集生态风险评价的重要参数“有效磷生态风险临界值”有待

于进一步深入研究确定。

参考文献:

- [1] 胡霁堂. 植物营养学[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1995:48-53.
HU Ai-tang. Plant nutrition science[M]. Beijing:Beijing Agriculture University Press, 1995:48-53.
- [2] 许晓光, 李裕元, 孟 岑, 等. 亚热带区稻田土壤氮磷淋失特征试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):991-999.
XU Xiao-guang, LI Yu-yuan, MENG Cen, et al. The characteristics of nitrogen and phosphorus leaching in a paddy soil in subtropics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):991-999.
- [3] MacDonald G K, Bennett E M, Taranu Z E. The influence of time, soil characteristics, and land use history on soil phosphorus legacies: A global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6):1904-1917.
- [4] Shen Z Y, Chen L, Hong Q, et al. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 454-455:383-392.
- [5] 陈 璐, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 黄土旱塬施肥对土壤颗粒组成及其有效磷富集的影响研究[J]. 水土保持学报, 2011, 43(1):39-43.
CHEN Lu, DANG Ting-hui, YANG Shao-qiong, et al. Loess Hanyuan fertilization on soil particles and the influence of the effective phosphorus enrichment research[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 43(1):39-43.
- [6] Muukkonen P, Hartikainen H, Alakukku L. Effect of soil structure disturbance on erosion and phosphorus losses from Finnish clay soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(1):84-91.
- [7] 柏兆海, 万其宇, 李海港, 等. 县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析: 以北京市平谷区为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1853-1860.
BO Zhao-hai, WAN Qi-yu, LI Hai-gang, et al. Evaluation of soil phosphorus accumulation and loss risk on arable land at county level: The example of Pinggu District, Beijing City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9):1853-1860.
- [8] Zhang W, Faulkner J W, Giri S K, et al. Evaluation of two langmuir models for phosphorus sorption of phosphorus-enriched soils in New York for environmental applications[J]. *Soil Science*, 2009, 174(10):523-530.
- [9] 章明清, 姚宝全, 李 娟, 等. 福建菜田氮、磷积累状况及其淋失潜力研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(1):148-155.
ZHANG Ming-qing, YAO Bao-quan, LI Juan, et al. N and P accumulation status and their leaching potential in vegetable fields in Fujian Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(1):148-155.
- [10] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施Ⅲ. 典型地区红壤磷素积累及其环境意义[J]. 土壤, 2001(5):227-231.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan. Handicap characteristics degradation of red soil fertility and reconstruction measures: Ⅲ. Typical area red soil phosphorus accumulation and its environmental significance[J]. *Soils*, 2001(5):227-231.
- [11] 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异[J]. 生态学报, 2013, 33(2):554-564.
CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing, et al. South county on the loess plateau farmland soil available nutrient variation of time and space[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2):554-564.
- [12] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局[J]. 土壤学报, 2014, 51(5):24-31.
LÜ Zhen-zhen, LIU Guang-ming, YANG Jin-song, et al. Bohai sea coastal areas with soil nutrient spatial variation and distribution pattern [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5):24-31.
- [13] 宋 春, 韩晓增. 长期施肥条件下土壤磷素的研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(1):21-26.
SONG Chun, HAN Xiao-zeng. Advances in phosphorus in long-term fertilized soil[J]. *Soils*, 2009, 41(1):21-26.
- [14] 杨 蕊, 李裕元, 魏红安, 等. 畜禽有机肥氮、磷在红壤中的矿化特征研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2011, 17(3):600-607.
YANG Rui, LI Yu-yuan, WEI Hong-an, et al. Livestock and poultry manure nitrogen and phosphorus in red soil mineralization characteristics in the study[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3):600-607.
- [15] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(2):248-256.
- [16] 王永壮, 陈 欣, 史 奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):260-268.
WANG Yong-zhuang, CHEN Xin, SHI Yi. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1):260-268.
- [17] 龙胜碧, 罗发娣, 黄万花, 等. 锦屏县不同地貌气候类型区耕地土壤养分变异分析[J]. 湖南农业科学, 2012(21):48-50.
LONG Sheng-bi, LUO Fa-di, HUANG Wan-hua, et al. Analysis of nutrient variability in cultivated soil from regions with different landform and climates in Jinping County[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(21):48-50.
- [18] 付晶莹, 朱晓芳. 庐山不同海拔高度土壤养分含量分析[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(15):73-74.
FU Jing-ying, ZHU Xiao-fang. Analysis on soil nutrient in different altitudes of Lushan[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(15):73-74.
- [19] 王 斌, 周志宇, 张 冈. 贺兰山西坡不同海拔梯度上土壤-植物系统磷相关性的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35):17630-17634, 17674.
WANG Bin, ZHOU Zhi-yu, ZHANG Gang. Research on the relationship between phosphorus in soil and plant system at different altitudes on the western slope of Helan Mountains[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(35):17630-17634, 17674.
- [20] 何松多, 张奇春, 王光火. 水稻土对磷的吸附及吸附态磷的释放特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(1):69-73.
HE Song-duo, ZHANG Qi-chun, WANG Guang-huo. Characteristics of phosphate sorption and sorbed-P release in paddy soils[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2010, 36(1):69-73.

- [21] 马良, 徐仁扣. pH和添加有机物料对3种酸性土壤中磷吸附-解吸的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 596-599.
- MA Liang, XU Ren-kou. Effects of regulation of pH and application of organic material on adsorption and desorption of phosphorus in three types of acid soils[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6): 596-599.
- [22] 秦胜金, 张玉树, 胡晓霞, 等. 不同利用方式下土壤对磷的吸附、解吸特征[J]. 现代农业科技, 2011(24): 285-287.
- QIN Sheng-jin, ZHANG Yu-shu, HU Xiao-xia, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of soils under different land use types[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(24): 285-287.
- [23] 李俊良, 朱建华, 张晓晟, 等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2): 126-129.
- LI Jun-liang, ZHU Jian-hua, ZHANG Xiao-sheng, et al. Nitrate leaching loss from soil and nutrient utilization by tomato in protected field[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(2): 126-129.
- [24] 黄运湘, 武孟祥, 赵成燕, 等. 南方主要烟草种植区植烟土壤肥力特征及硫素状况[J]. 现代农业科技, 2010(20): 283-284.
- HUANG Yun-xiang, WU Meng-xiang, ZHAO Cheng-yan, et al. Fertility characteristic and sulfur status of tobacco-growing soil of main tobacco-growing areas in Southern China[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(20): 283-284.
- [25] 李继明, 黄庆海, 袁天佑, 等. 长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 563-570.
- LI Ji-ming, HUANG Qing-hai, YUAN Tian-you, et al. Long-term application of green manure on red soil paddy rice yield and soil nutrient[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 563-570.
- [26] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 141: 66-73.
- [27] 王光火. 红壤在不同pH下对磷的吸附和解吸作用[J]. 土壤通报, 1989, 20(2): 70-71.
- WANG Guang-huo. Red soil under different pH on the adsorption and desorption of phosphorus[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1989, 20(2): 70-71.
- [28] Wei O Y, Xu Y M, Hao F H, et al. Effect of long-term agricultural cultivation and land use conversion on soil nutrient contents in the Sanjiang Plain[J]. *Catena*, 2013, 104: 243-250.
- [29] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 105-110.
- [30] 程文娟, 史静, 夏运生, 等. 滇池流域农田土壤氮磷流失分析研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 52-55.
- CHENG Wen-juan, SHI Jing, XIA Yun-sheng, et al. Farmland and runoff of nitrogen and phosphorus in Dianchi Watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 52-55.
- [31] Meng Q H, Fu B J, Tang X P, et al. Effects of land use on phosphorus loss in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2008, 139(1-3): 195-204.