

分类号

密级



华中农业大学

HUAZHONG AGRICULTURAL UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR'S THESIS

基于景观条件的土壤有效磷空间分布特征分析

Spatial Distribution and Correlation Analysis of Soil
Available Phosphorus Based on Landscape Conditions

姓 名: 杨森
NAME: YANG SEN

学 号: 2017303210307
STUDENT NO.: 2017303210307

专 业: 地理信息科学
MAJOR: Geographic Information
Science

导 师: 张海涛 副教授
SUPERVISOR: ASSOCIATE PROFESSOR
ZHANGHAITAO

中国 武汉
WUHAN, CHINA

二〇二一年 六 月

JUNE, 2021

分类号

密级

华中农业大学学士学位论文

基于不同景观条件的土壤有效磷空间分布特征分析

Spatial distribution characteristics of soil
available phosphorus based on different landscape
conditions

姓 名：杨森

学 号：2017303210307

专 业 班 级：地理信息科学 1701

学 位 类 型：理学学士学位

指 导 教 师：张海涛 副教授

华中农业大学资源与环境学院

华中农业大学学位论文独创性声明及使用授权书

| | | | |
|--------------|---|------------|-------|
| 学位论文 是否保密 | 否 | 如需保密, 解密时间 | 年 月 日 |
|--------------|---|------------|-------|

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的
研究成果。尽我所知, 除了文中特别加以标注和致谢的地方外, 论文中不包含其他
人已经发表或撰写过的研究成果, 也不包含为获得华中农业大学或其他教育机构
的学位或证书而使用过的材料, 指导教师对此进行了审定。与我一同工作的同志
对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明, 并表示了谢意。

签 名: 杨森 时间: 2021 年 6 月 18 日

学位论文使用授权书

本人完全了解华中农业大学关于保存、使用学位论文的规定, 即学生必须按
照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本; 学校有权保存提交论文的印刷版
和电子版, 并提供目录检索和阅览服务, 可以采用影印、缩印或扫描等复制手段
保存、汇编学位论文。本人同意华中农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、
传播学位论文的全部或部分内容, 为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献
传递和交换服务, 同时本人保留在其他媒体发表论文的权力。

注: 保密学位论文(即涉及技术秘密、商业秘密或申请专利等潜在需要提交保密
的论文)在解密后适用于本授权书。

学位论文作者签名: 杨森 导师签名: 张源

签名日期: 2021 年 6 月 18 日 签名日期: 2021 年 6 月 18 日

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 摘要 | i |
| Abstract..... | ii |
| 1 引言 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究意义 | 2 |
| 1.3 研究现状 | 2 |
| 2 研究方案 | 3 |
| 2.1 研究区域概况 | 3 |
| 2.2 数据来源 | 5 |
| 2.2.1 采样点数据 | 5 |
| 2.2.2 DEM 数据 | 6 |
| 2.2.3 降雨量数据 | 6 |
| 2.3 数据处理 | 6 |
| 2.3.1 异常值的识别与处理 | 6 |
| 2.3.2 正态检验与变换 | 7 |
| 2.3.3 景观条件分级 | 7 |
| 2.3.4 半变异函数分析方法 | 8 |
| 2.3.5 预测模型 | 9 |
| 2.3.6 软件平台 | 9 |
| 3 结果与分析 | 10 |
| 3.1 土壤有效磷的描述性特征分析 | 10 |
| 3.2 土壤有效磷的空间变异特征分析 | 10 |
| 3.2.1 半方差函数分析 | 11 |
| 3.2.2 趋势分析 | 12 |
| 3.2.3 普通克里金插值 | 13 |
| 3.3 景观条件对土壤养分的影响 | 14 |
| 3.3.1 土壤有效磷与地形相关性分析 | 15 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 3.3.2 土壤有效磷与气候相关性分析 | 15 |
| 3.3.3 土壤有效磷与其他景观条件的相关性分析 | 16 |
| 3.4 有效磷含量预测 | 17 |
| 3.4.1 预测模型构建 | 17 |
| 3.4.2 空间分布与精度比较 | 18 |
| 4 总结与讨论 | 19 |
| 4.1 讨论 | 19 |
| 4.2 结论 | 20 |
| 4.2.1 空间分布特征 | 20 |
| 4.2.2 相关性 | 20 |
| 4.2.3 预测模型 | 21 |
| 4.3 展望 | 21 |
| 参考文献 | 22 |
| 致谢 | 26 |

摘 要

本研究以地处鄂西山地和江汉平原过渡地带的宜都市作为研究对象,利用经实地采样得到的研究区土壤有效磷含量样点数据,将地统计学和地理信息系统结合,研究了土壤有效磷的空间分布特征。并且结合人为因素与自然因素,从中选择部分景观要素来分析它们与土壤有效磷含量之间的相关性以及引起这些相关性的潜在原因。最后,从中选择相关度高的景观因子利用多元线性回归(MLR)、地理加权回归(GWR)和结合成土母质的克里格方法(PMK)三种方法建立土壤有效磷预测模型。

结果表明:整个研究区的土壤有效磷含量在 $4.2\sim 48\text{mg/kg}$ 之间,大部分区域拥有适宜的磷素水平,小部分地区缺乏有效磷,需要针对性的施磷肥以补充有效磷。土壤有效磷的变异系数为 38%,整体变异性较强,受到外界因素影响比较强烈。块金比为 0.73,表明土壤有效磷含量拥有中等程度的空间自相关性,其中随机性影响占总体空间变异的 73%。趋势分析的结果显示研究区土壤有效磷含量在东西、南北两个方向上均有较明显的二阶趋势。通过克里格插值与 ArcGIS 制图得到宜都市土壤有效磷空间分布图,图中显示土壤有效磷在北部与东南部含量较高,在西南部与中心区域的含量较低。

高程、坡度、降雨量均对土壤有效磷含量有一定的影响,其中高程、坡度与土壤有效磷含量呈现负相关关系,降雨量与土壤有效磷含量呈显著正相关关系。主载作物类型和成土母质则对有效磷含量的影响较小。种植不同作物的土壤中,种植水稻的土壤样点有效磷含量较高,种植茶树的土壤有效磷含量较低。不同成土母质生成的土壤有效磷水平为泥质岩类风化物>第四纪黏土>碳酸盐类风化物>河湖冲(沉)积物。这可能有以下几种原因:高程导致温度降低从而影响土壤中的生物化学反应速率,使总磷转换为有效磷的效率降低;坡度增加会使降雨后形成的地表径流强度增加,导致土壤养分的流失增强;降雨量与土壤湿度和表面磷肥的向下淋溶有关;主载作物的不同可以视为人类农业生产活动方式的不同对土壤有效磷含量的影响。最后,按照单因子相关性分析结果选择土壤母质、全氮与海拔作为辅助变量预测了研究区土壤有效磷的分布情况。本研究结果为研究区域合理利用土地资源与科学进行农业生产提供了一定的依据。

关键词: 景观条件; 有效磷; 空间分布; 相关性; 克里金插值

Abstract

In this study, Yidu City, which is located in the transition zone between Western Hubei mountain and Jiangnan Plain, was selected as the research object. The spatial distribution characteristics of soil available phosphorus were studied by combining geostatistics and geographic information system. Combined with human factors and natural factors, some landscape elements were selected to analyze the correlation between them and soil available phosphorus content, as well as the potential causes of these correlations. Finally, landscape factors with high correlation were selected to establish soil available phosphorus prediction model by using multiple linear regression (MLR), geographically weighted regression (GWR) and Kriging method (PMK) combined with soil parent material.

The results showed that: the content of available phosphorus in the whole study area ranged from 4.2 mg / kg to 48 mg / kg, most of the areas had suitable phosphorus level, and a small part of the area lacked available phosphorus, so it was necessary to apply phosphorus fertilizer to supplement available phosphorus. The coefficient of variation of soil available phosphorus was 38%, and the overall variability was strong, which was strongly affected by external factors. The nugget to gold ratio was 0.73, which indicated that the spatial autocorrelation of soil available phosphorus content was moderate, and the random effect accounted for 73% of the total spatial variation. The results of trend analysis showed that the content of soil available phosphorus in the study area had an obvious second-order trend in the east-west, north-south directions. Through Kriging interpolation and ArcGIS mapping, the spatial distribution map of soil available phosphorus in Yidu city was obtained. The map showed that the content of soil available phosphorus was higher in the north and Southeast, and lower in the southwest and central region.

Elevation, slope and rainfall all have a certain impact on soil available phosphorus content, among which elevation, slope and soil available phosphorus content show a negative correlation, and rainfall and soil available phosphorus content show a significant positive correlation. The main crop type and parent material had little effect on the content of available phosphorus. Among the soils planted with different crops, the soil samples planted with rice had higher available phosphorus content, while the soil samples planted

with tea had lower available phosphorus content. The results showed that the soil available phosphorus levels generated by different parent materials were argillaceous weathering > Quaternary clay > carbonate weathering > fluvial and lacustrine alluvium. This may be due to the following reasons: elevation leads to the decrease of temperature, which affects the rate of biochemical reaction in soil and reduces the efficiency of total phosphorus conversion to available phosphorus; The increase of slope will increase the intensity of surface runoff after rainfall, resulting in the increase of soil nutrient loss; Rainfall is related to soil moisture and downward leaching of surface phosphate fertilizer; The difference of main crops can be regarded as the influence of different modes of agricultural production on soil available phosphorus content. Finally, according to the results of single factor correlation analysis, soil parent material, total nitrogen and altitude were selected as auxiliary variables to predict the distribution of soil available phosphorus in the study area. The results of this study provide a certain basis for the rational use of land resources and scientific agricultural production in the study area.

Keywords: Landscape condition; Available phosphorus; Spatial distribution; Correlation; Kriging interpolation

1 引言

1.1 研究背景

土壤是动植物生长生存、工业生产等的重要基础之一。土壤在形成与演变的过程中不仅仅受气候、地形、生物、时间等自然因素影响，同时还会被耕作制度、肥料、种植工具等人为因素所影响（吴昊 2015）。土壤中磷元素含量的高低一般由总磷含量与有效磷含量这两种指标来进行评价。总磷（TP）是指土壤中各种形态的磷的总和，有效磷（AP）是指土壤中的那些能直接被植物吸收利用的磷素，它在土壤中主要以水溶性磷的方式存在，此外还有一些以吸附态磷和有机态磷形式存在的有效磷（孙桂芳等 2011）。磷元素在物质、能量的合成以及细胞的分裂等方面发挥着不可或缺的作用，但在自然界中磷的供应并非无限，所以土壤中的磷元素含量是植物生长发育的一种限制性因素（Litaor et al. 2005）。磷元素含量在土壤内的变化短期内会直接引起土壤理化性质的改变与植物生长状态的变化，长期变化则会导致地表植被类型、微生物活性、凋落物分解速率等的改变（Yang et al. 2013）。与之相对的，磷元素在生态环境中的转变也受到土壤理化性质（Turner et al. 2013）、海拔与气候（Zhou et al. 2016）、土地利用方式（张倩等 2018）等自然条件以及人类活动等因素的影响。因此需要根据土壤理化性质、当地条件等因素选择适宜的土地利用方式以及管理措施，不当的土地利用和管理方式会导致土壤质量下降，最终加速土壤侵蚀和土壤退化。

景观在广义上可以概括为某种尺度上的，具有异质性或斑块性的空间单元，它的核心是包括物理的、生物的、经济社会和人文方面的空间异质性（邬建国 2007）。正因为景观是一定区域内由气候、地貌、地形、水体、土壤、植物和动物等所构成的综合体（肖笃宁等 1997），所以不仅与外部景观相互影响，在它内部的各种景观要素之间也相互影响，最终表现为一个特定的景观综合体。在开放系统中，景观异质性是决定土壤中养分例如有效磷的分布特征的一种重要结构（赵玉涛等 2002）。例如，海拔高度不同决定了水热条件的不同，在一定程度上决定了土壤颗粒直径和土壤湿度等，进而对土壤有效磷含量造成影响（张维理 2014）；坡向影响植物以及土壤接受到的光照强度，从而影响植物的生长状态，对土壤的有效磷含量产生了影

响；坡度决定了土壤受降雨、风力侵蚀的强度，在很大程度上决定着土壤内养分流失的强度，因此对土壤的有效磷含量有很大影响（马进川 2018）。通过研究分析这些空间异质的景观条件能够为土壤有效磷含量的空间分布与相关性带来更加深刻的理解。

本研究将地统计学方法与 GIS 结合来研究异质景观条件下的土壤有效磷含量的空间分布特征和有效磷含量与景观条件之间的相关性。一方面，根据宜都市样点数据对土壤有效磷进行空间分布特征分析；另一方面，通过不同景观条件分析各个景观要素与土壤磷含量的相关性并建模预测。研究结果可以为农业生产中科学施用磷肥提供依据，从而减少因磷元素不足而造成的农业减产或磷素过量导致的环境问题。

1.2 研究意义

农业用地的分布与土壤有效磷的空间变异特征十分复杂，而景观条件可以反映一个区域的气候、地理、生物、经济、社会与文化等综合特征，因此通过研究这个综合体内部的土壤有效磷与地形、地貌、海拔、降雨量等景观条件的关联性，我们可以更好地分析土壤有效磷含量的分布情况。土壤有效磷指标的高低直接反映了土壤中磷素的贮量和供应能力，进而可以反映出该地区植物生长状况（李松伟等 2013）。土壤中有有效磷含量较低时会对植物正常的生长发育产生直接影响，导致农业上出现产量减少甚至农作物死亡；但是如果在土壤有效磷含量已经较高时，仍长期对作物施磷肥，则可能会导致磷素向水体流失，最终使得水体富营养化或其他环境问题（鲁如坤 2003）。因此明确土壤有效磷含量在空间上的差异性及其分布对农业生产具有重要意义，是进行土壤养分科学管理的前提和基础。

本研究通过地统计学与 GIS 技术相结合，对不同景观条件下的有效磷空间分布特征进行分析，使我们准确而直观地了解宜都市的土壤磷素的空间分布状况以及各个景观条件与有效磷含量的相关性。研究采用的宜都市样点数据，基本来源于柑橘园、茶园、水稻田等农业生产用地，从而为推行合理施肥、有效施肥和有效控制农业生产所导致的磷污染提供重要的科学依据。

1.3 研究现状

新世纪以来计算机技术飞速发展，目前对土壤有效磷的空间分布特征研究均结

合了 GIS 技术与地统计学来开展，两者结合发展趋势非常迅速（张敏 2011）。地统计学以区域化变量为研究对象，探讨其在空间内的变异性、分布结构，并根据以上结果来对空间变量进行模拟和空间插值。而 GIS 软件主要用于空间数据的管理、查询、显示、处理等。当前已经有越来越多的研究者通过空间大数据与分布式 GIS 技术，运用地统计学的基本原理和方法，结合 GIS 软件对土壤有效磷的空间变异情况进行研究，并分析各种影响因子与土壤有效磷的相关关系。

异质景观条件下的土壤差异研究涉及很多学科，属于热门领域，在异质景观下的土壤成分差异研究已经有较多的成果。秦富仓等基于 DEM 模型，结合地统计学与 GIS 研究了高程、坡度、坡向对土壤养分空间分布与变异性的影响以及这些因素和耕地养分的相关性（秦富仓等 2019）。杨家慧等也利用 DEM 提取地形因子分析了马尾松人工林土壤养分空间的分布特征和影响其分布的主要因子（杨家慧等 2020）。Junran 等在新墨西哥南部的荒漠化草原实验区，研究了风力作用下鼠尾粟属-豆科灌木和格兰马草-豆科灌木这两种异质景观下的土壤养分上的差异，研究表明在鼠尾粟属-豆科灌木景观下要比在格兰马草-豆科灌木景观下，与有机质相关的土壤养分如 SOC、TN 等再分布要比其他离子更显著（Li et al. 2008）。来自科尔沁沙漠的研究显示，根据荒漠-绿洲交错区、沙漠边缘、沙漠腹地的典型景观不同，土壤养分的含量也不相同（Zuo et al. 2010）。这些研究一部分是以地形因子为主研究景观条件对土壤养分分布的影响，一部分是以整体景观的差异来研究土壤养分的差异。这两者要么对土壤养分的空间分布特征研究较少，要么选择的影响因子主要为自然条件，本实验在地形因子的基础上，选择了主要种植作物作为一种受人类活动影响的因子，希望能对土壤有效磷含量分布情况找出更多原因。

2 研究方案

2.1 研究区域概况

研究区位于鄂西山地和江汉平原过渡地带，介于东经 $110^{\circ}05' \sim 111^{\circ}36'$ ，北纬 $30^{\circ}05' \sim 30^{\circ}36'$ 之间，总体地势呈现西南高、东北低，由西南向东北的剖面呈现梯形。南方有两条东西走向的山脉，占全市总面积的五分之二，高程在 200~800 m 之间；东北部为长江与清江沿岸，地势平坦，宜都城市区呈现长条形位于此处，海拔高度

总体不到 250 m，土地肥沃。宜都市属于亚热带季风气候，冬季低温少雨，夏季高温多雨，四季分明，雨热同期。并且境内河流水系发育，溪河纵横，共有大小河流 50 余条。土地资源分布格局大体是“七山一水两分田”。研究区土壤主要为红壤、黄壤、黄棕壤、石灰岩、紫色土、潮土和水稻土这 7 大土类。

宜都市的农业作物主要有柑橘、茶树、油菜、水稻、玉米等。其中柑橘园主要建造于宜都市北部的丘陵山地，茶树主要种植于西北部的山地，水稻、玉米和油菜等作物则多见于宜都市东南部，其余零星分布在研究区域内。2018 年实现农业总产值 782116 万元，其中种植业 449576 万元。根据宜都市统计局，2018 年宜都市主要的农产品产量为：粮食作物 9.86 万吨，油料作物 2.16 万吨，蔬菜为 23.84 万吨，茶叶为 1.87 万吨，柑橘为 63.22 万吨。

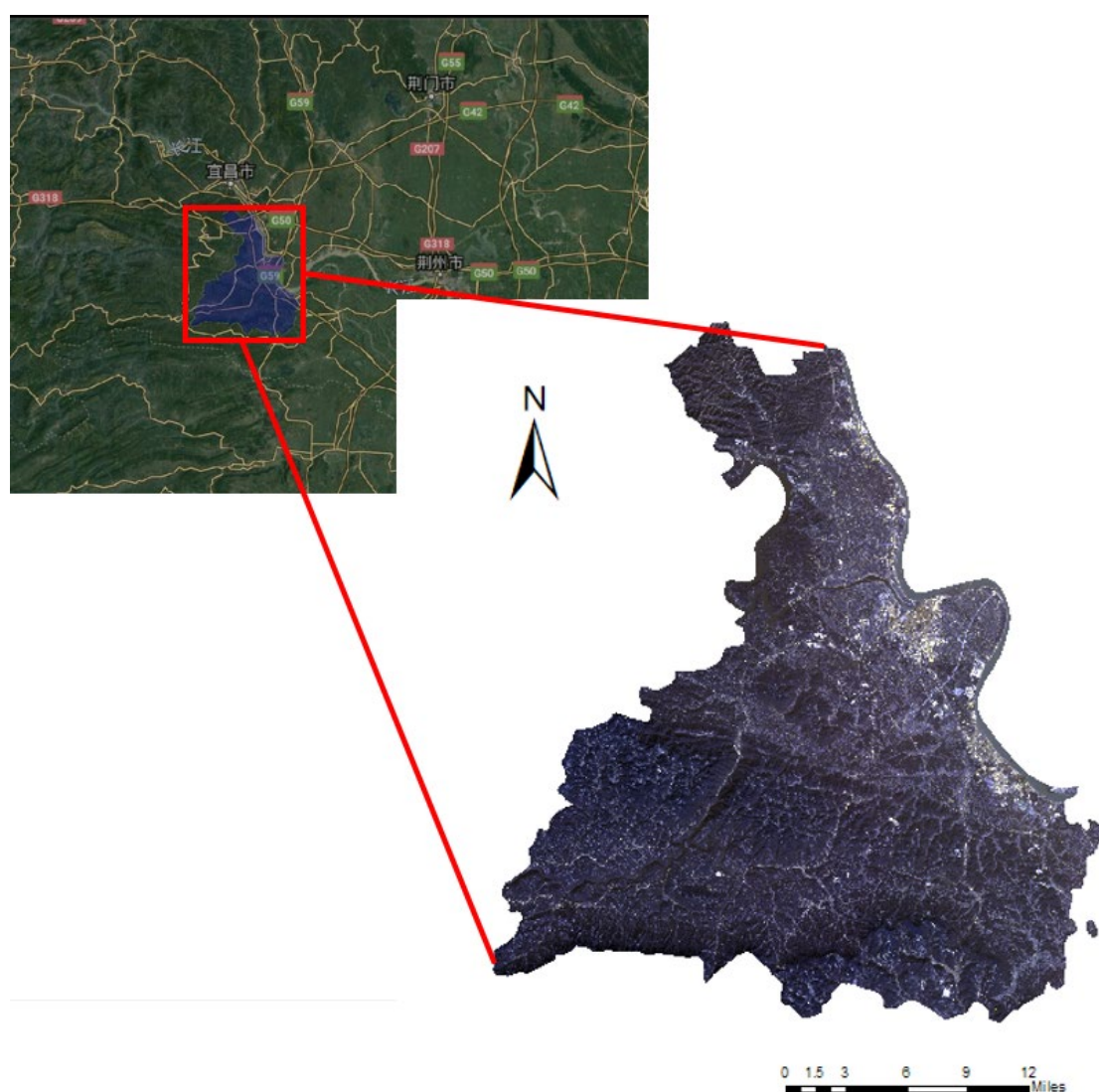


图 1 研究区示意图

Fig.1 Study area

2.2 数据来源

2.2.1 采样点数据

采样点均匀分布在宜都市内的农业用地内，采样点数据主要包括：采样年份、经度、纬度、海拔、土类、成土母质、地貌类型、地形部位、土壤 pH、有机质、全氮、有效磷等。

实地采样时利用五点采样法选取采样点。具体操作为：先确定对角线的中点作为中心抽样点，再在对角线上选择四个点作为样点，要求它们与中心样点距离相等。采样完成后，将取得的土样送至实验室内，采用碳酸氢钠浸提+钼锑抗比色法测定土壤的有效磷含量。

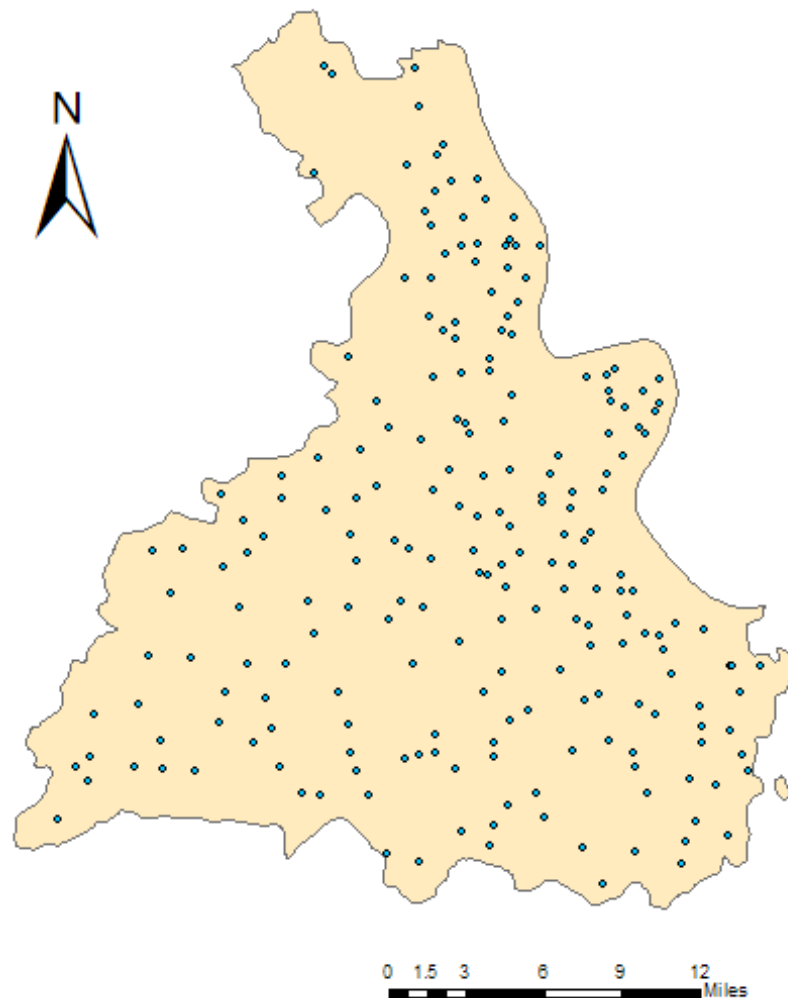


图 2 采样点位置示意图

Fig.2 Location of sampling sites in the study area

2.2.2 DEM 数据

本研究所使用的 DEM 数据来源于先进星载热发射和反射成像仪(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER)计算生成的 ASTER GDEM v2 数据(杨帅等 2021)。2009 年, NASA 与 METI 发布了 ASTER GDEM v1 数据, 在各类对地观测研究中得到了广泛应用。但是, v1 数据由于云污染, 水掩膜等问题导致高纬度地区部分数据出现异常, 所以只能用于部分科研应用。因此 NASA 与 METI 在 2011 年发布了 ASTER GDEM v2, 它在 v1 的基础上利用更优秀的算法改进了 ASTER 所采集的原始影像, 并且新增了 26 万幅光学立体像对数据, 有效的提高了数据的空间分辨率精度和高程精度。根据 NASA 与 METI 这两个机构联合评估的结果, GDEM v2 的绝对高程精度 LE95 约为 17 m, 对应 RMSE 约为 8.7 m(唐新明等 2021)。

2.2.3 降雨量数据

研究所用降雨量数据来自气候危害小组的红外降水数据集。红外降水数据是基于“智能”插值技术和红外冷云持续时间观测的高分辨率、长周期记录降水估算, 通过卫星图像、现场测量和高分辨率气候学综合开发出的产品(章跃芬 2020)。它将卫星图像与原位站数据相结合, 从而创建了栅格化的降雨时间序列, 可用于趋势分析和季节性干旱监测等。使用时通过谷歌地球引擎(GEE)下载每月的降雨量数据后在 ArcGIS 中处理得到累计年平均降雨量数据。

2.3 数据处理

2.3.1 异常值的识别与处理

异常值是采样点数据中出现几率较小、误差概率较大的值, 在进行地统计学分析时可能会影响整体的分布情况, 从而使得半方差分析准确性下降, 所以需要在分析前将其剔除。本次实验主要采用两种方式对异常值进行识别, 分别为阈值法处理与箱线图处理。先使用箱线图去除一部分异常值, 然后再使用样本均值 α 加减 2 倍标准差 S , 在此区间 $[\alpha \pm 2S]$ 以外的数据均定义为特异值, 分别用正常的最大值和

最小值来代替异常值。阈值法处理的标准是由数据集的均值与标准差为基础的，而箱线图判断异常值的标准以四分位数和四分位距为基础，因此将这两者相结合，从而得到更加合理的异常值处理结果。

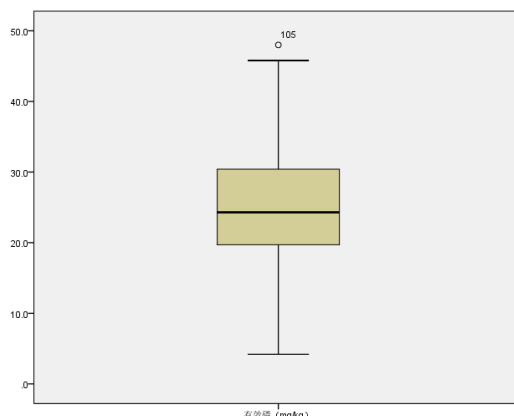


图 3 采样点有效磷含量箱线图

Fig.3 Box plot of available phosphorus content at sampling points

2.3.2 正态检验与变换

样点数据是否满足正态分布是能否利用地统计学克里金法进行有效磷空间分布特征分析的前提（李伟松等 2014）。本研究对样点数据采用单样本 K-S 检验其是否符合正态分布。在检验时选择显著水平 $\alpha=0.05$ ，如果 $PK-S>0.05$ 则认为样点数据符合正态分布，反之则为偏态分布。如果原始数据不满足正态分布，通常还需要使用一些处理方法进行数据变换，常用的处理方法有对数变换、幂变换等。

2.3.3 景观条件分级

本研究使用的景观条件包括高程、坡度、坡向、降雨量、土类、主要种植作物。其中根据 DEM 数据来提取出所需地形相关的景观条件，包括坡度、坡向等，由 ArcGIS 内的 Spatial Analyst 工具计算实现，然后通过栅格重分类工具对采样点进行统计分类。研究区样点数据的海拔高度从 0~800 m 之间均有分布，分级间隔数值为 160m,将海拔高度分为<150 m、150~300 m、300~450 m、450~600 m、600~750 m 和>750 m 这 6 个等级。研究区域坡度在 0°~36°之间，在分级时参考国际地理学会划分标准，将坡度分 0°~2°（平原或微倾斜坡）、2°~5°（缓坡）、5°~15°（斜坡）、

15°~25°（陡坡）、>25°（急坡）5 个等级。根据研究区域斜坡的向阳程度将其分为向阳坡（135°~225°）、半阳坡（90°~135°、225°~270°）、半阴坡（45°~90°、270°~315°）、阴坡（0°~45°、315°~360°），并且将它们分别赋值为 1~4。研究区降雨量数据在 410~566mm 之间，均属于半湿润，与当地气候条件符合，按照研究区情况分为 3 类，第一类为<450 mm、第二类为 450~550 mm 之间、第三类为>550 mm。土类与主要种植作物无法分级，因此单独讨论这些景观条件与有效磷数据的相关程度。

表 2 地形因子级别代码表
Table 2 Code table of terrain factor level

| 级别 | 高程（单位：米） | 坡度 | 坡向 |
|----|----------|---------|--------------------|
| 1 | <150 | 0°~2° | 0°~45°、315°~360° |
| 2 | 150~300 | 2°~5° | 45°~90°、270°~315° |
| 3 | 300~450 | 5°~15° | 90°~135°、225°~270° |
| 4 | 450~600 | 15°~25° | 135°~225° |
| 5 | 600~750 | >25° | |
| 6 | >750 | | |

表 3 降雨量级别代码表
Table 3 Rainfall level code table

| 级别 | 降雨量（单位：毫米） |
|----|------------|
| 1 | <450 |
| 2 | 450~550 |
| 3 | >550 |

2.3.4 半变异函数分析方法

本研究通过克里格方法插值得到整个研究区的有效磷空间分布图，所以需要利用半变异函数来模拟最佳模型从而绘制散点图。半变异函数是能够反应区域变量的结构性变化和随机性变化的一种地统计学特有的工具，它用来反映在一定范围内的区域性变量的空间变异程度与空间自相关性（李旭等 2014）。

半变异函数的计算公式为：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2$$

式中： h 为步长或样本距； $N(h)$ 为样点对数； $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为点 x_i 和 $x_i + h$ 的值。

土壤有效磷一般能够利用半变异函数理论模型进行拟合，如线性模型、高斯模型、球状模型、指数模型等。最佳拟合模型的选择通常需要考虑块金值与有效变程，最终由决定系数 R^2 和残差平方和（RSS）确定。若决定系数越大，残差平方和越小，那么就说明模型的拟合精度越高，曲线拟合效果越好（Sepehr et al. 2009）。

2.3.5 预测模型

多元线性回归（MLR）是一种很常用的建立全局模型方法，它通过选取数个辅助变量来建立预测模型。作为一种非空间的全局模型，它忽视了变量区域内部存在的随机性与局部变异特征。地理加权回归（GWR）则是一种局部空间统计模型，它与 MLR 模型的不同之处在于其可根据距离衰退公式在不同的位置上赋予各个自变量不同的权重。这样可以将空间随机的一部分加入到模型中，从而反映出变量更真实的空间分布状况（段丽君等 2019）。

结合成土母质的克里格方法（PMK）是按照成土母质将空间变量分类，并分别求出它们的均值与残差，最终用残差进行克里金插值后加上均值即为预测值。

2.3.6 软件平台

本研究利用统计学软件 SPSS 对土壤有效磷样点数据进行平均值、标准差、方差、偏度等描述性统计特征分析。利用单样本 K-S 检验样点有效磷含量数据以及经过对数转换、幂变换后的样点有效磷含量数据是否满足正态分布。检验通过后，采用地统计学软件 GS+7.0 获取实验半方差函数最佳参数并分析土壤有效磷含量的空间变异特征和各向异性。对样点土壤有效磷的趋势分析、普通克里金插值以及有效磷含量分布专题图的制作等则由 ArcGIS 完成。最后利用 SPSS 进行 MLR 模型构建，ArcGIS 进行 GWR 模型构建，并且进行精度验证。

3 结果与分析

3.1 土壤有效磷的描述性特征分析

在研究区一共采集了 230 个土样，即每个村选择了两个农业用地样地进行采集得到有效磷的数值。实验以测定的土壤有效磷含量作为原始数据和处理后的数据进行描述性统计，结果如表 4。

有效磷是土壤中能被直接被作物所吸收的磷元素，根据农业土壤标准，土壤有效磷大于 46mg/kg 时可认为此处土壤具有较高的磷素养分水平。从表 4 中可知，研究区土壤有效磷含量在 4.2~48mg/kg 间，按照这个标准，大部分土壤的磷素水平都处于正常状态，不易造成环境问题。此外，速效磷的变异系数（CV）为 0.38，这说明样点土壤速效磷含量表现为中等程度变异（ $0.1 \leq CV \leq 1.0$ ）。

一般进行地统计学分析和克里金插值的前提是数据满足正态分布，在显著性 $\alpha=0.05$ 水平下的单样本 K-S 检验结果显示除对数变换以外的数据均符合正态分布，其中原始数据已经通过了 K-S 检验，这可能也是变换后数据正态性检验结果反而更差的原因。原始数据完成了箱图处理与阈值法处理后，中值最接近平均值，偏度与峰度比其它处理方法都要更接近 0，正态性检验的结果为 $PK-S=0.65 > 0.05$ ，在 95% 置信区间达到了显著水平呈现正态分布，为完成土壤有效磷的空间半方差函数分析与克里金插值奠定了基础。

表 4 土壤有效磷的描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of soil available phosphorus

| 处理方法 | 均值 | 最大值 | 最小值 | 标准差 | 变异系数 | PK-S | 偏度 | 峰度 | 分布状态 |
|------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 原始数据 | 24.35 | 48 | 4.2 | 9.40 | 0.38 | 0.31 | -0.07 | -0.19 | 正态分布 |
| 阈法处理 | 24.56 | 43 | 6.5 | 8.13 | 0.33 | 0.65 | -0.06 | -0.18 | 正态分布 |
| 对数变换 | 1.34 | 0.62 | 1.68 | 0.21 | 0.16 | 0.00 | -1.43 | 2.10 | 偏态分布 |
| 幂变换 | 4.88 | 2.55 | 6.56 | 0.86 | 0.17 | 0.11 | -0.55 | 0.02 | 正态分布 |

3.2 土壤有效磷的空间变异特征分析

上文完成了土壤有效磷含量的经典统计学分析，但是这只能描述有效磷含量总

体的变化情况，不能体现局部变化的特征，和空间变异的具体情况如相关性、独立性、随机性、结构性。所以，需要采用半方差函数和克里金插值法对土壤有效磷含量进行进一步的分析。

3.2.1 半方差函数分析

土壤有效磷经箱图和阈值法处理后的数据的半变异函数理论模型的拟合结果见表 5。其中块金值、基台值、块金比与变程是反映有效磷数据空间变异特征的参数，决定系数 (R^2) 和残差平方和 (RSS) 是反映该模型拟合效果的参数。如表 5，实验中一共测试了三种理论模型，其中 R^2 在 0.131~0.412 之间，RSS 在 160~396 之间。参数显示三种理论模型的拟合效果均不理想，但是高斯模型的 $R^2 \geq 0.3$ ，说明该模型具有一定的参考价值。

此半变异函数模型提供了三个重要参数，块金值 (C)、基台值 (C_0)、变程 (range)。块金值反映出最小抽样尺度下变量的变异性与测量误差，它可以表示随机部分的空间异质性。基台值是半方差值随步长增加到一个相对稳定的水平上时对应的半方差值，是区域化变量总体特征的体现。因此块金值与基台值比值 ($C_0/(C_0 + C)$) 的大小就代表了区域内变量的空间相关程度以及由随机变化引起的空间异质占系统内总体变异的程度 (张敏等 2010)。系统内总体变异主要包含结构性因素 (成土母质、土壤类型、气候、地形等自然因素) 与随机性因素 (如耕作制度、施肥、种植制度等人为因素) (贾振宇等 2018)。当 $C_0/(C_0 + C) < 25\%$ 时，表明变量具有强烈的空间自相关性，并且空间变异主要受到结构性因素影响；当 $25\% < C_0/(C_0 + C) < 75\%$ 时，表明变量具有中等程度空间自相关性，并且空间变异受到结构性因素与随机性因素的影响；当 $75\% < C_0/(C_0 + C) < 100\%$ 时，表明变量空间自相关性弱，受到结构性影响很少 (杨之江等 2018)。

表 5 土壤有效磷含量半变异函数理论模型的相关参数

Table 5 Theoretical semivariogram model and corresponding parameters of available soil phosphorus contents

| 理论模型 | 块金值 | 基台值 | 块金比 | 变程/m | R^2 | RSS |
|------|-------|-------|------|------|-------|-----|
| 高斯模型 | 51.73 | 69.10 | 0.73 | 620 | 0.412 | 160 |
| 指数模型 | 41.20 | 69.07 | 0.60 | 490 | 0.104 | 396 |
| 球状模型 | 47.31 | 67.11 | 0.70 | 450 | 0.131 | 312 |

如表 5 所示，试验区的块金比数值为 73%，这说明有效磷具有中等程度的空间自相关性，结构性因素与随机性因素的作用均有体现。但是随机性因素较结构性因素对土壤有效磷含量的影响更大，占到空间分布总变异的 73%。变程为 620m，变量的各向异性不明显。

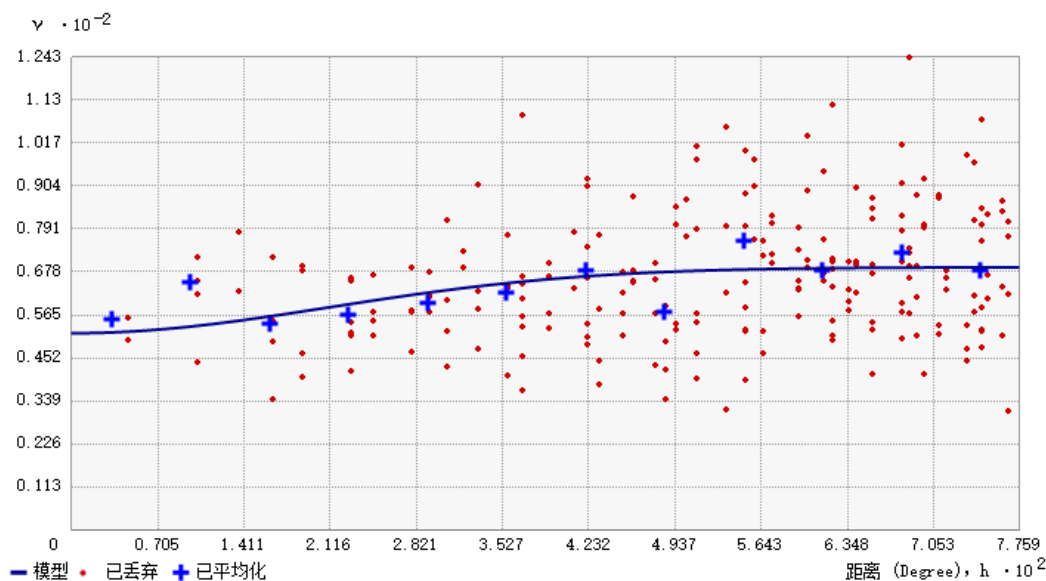


图 4 土壤有效磷实验半方差函数

Fig4 Semi-variogram of soil nutrients and heavy metals

3.2.2 趋势分析

利用 ArcGIS 地统计模块数据探索中的趋势分析工具，得到土壤有效磷含量的趋势效应特征。图 5 为完成趋势分析后有土壤效磷含量数据的趋势效应结果，图中的 X 代表正东方向，Y 代表正北方，Z 轴为样点有效磷数据属性值。在图中左侧曲线代表南北方向上的趋势效应变化情况，右侧曲线则为东西方向上的趋势效应变化情况。图 5 中能够明显看出南北向上的有效磷含量呈现向下的半个抛物线状的分布，东西方向则为呈现向上的“U”型分布，这说明数据整体的趋势效应比较明显，在东西、南北两个方向上均表现为二阶趋势变化特征。获得该趋势特征后，在进行半方差分析时可以通过去除该趋势，获得更精确的半变异函数理论模型；而在进行克里格空间插值时，添加该趋势特征便可得到更有实际应用价值的预测结果（李松伟等 2014）。

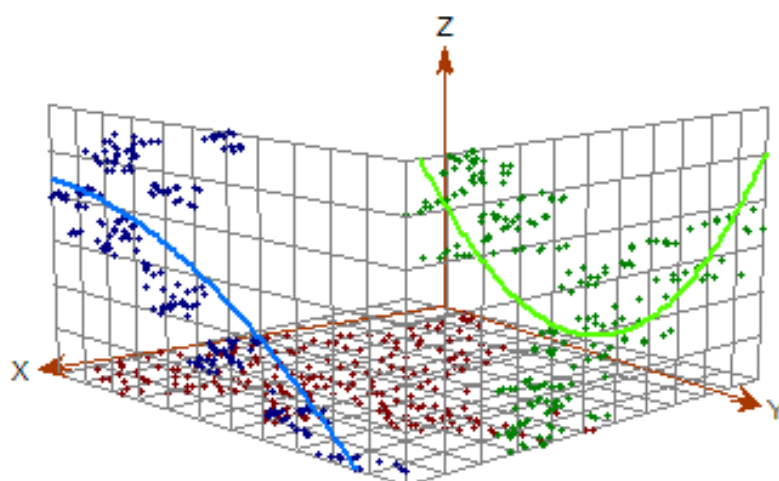


图 5 有效磷数据趋势分析结果图

Fig.5 Trend analysis result chart of available phosphorus data

3.2.3 普通克里金插值

基于上文半方差分析与趋势分析的结果，可以利用 ArcGIS 的地统计工具完成普通克里金插值得到土壤有效磷的空间分布插值图像，如图 6 所示。使用经过误差处理后的土壤有效磷数据，采用普通克里格法不进行数据变换选取二阶趋势参数和高斯模型拟合。从图中可以看出总体上北部与东南部有效磷含量较高，而西南部与中心区域的有效磷含量较低。

总体的有效磷养分处于适量状态。结合宜都市各农业作物的主要种植区域，西南部主要为茶园，东南部为水稻玉米等作物种植，北端为柑橘园。其中柑橘园根据鲁剑巍等对柑橘园土壤养分的分级标准，研究区有效磷数值基本位于 15~80mg/kg 之间，为适量的磷素水平适量，有利于农业生产。而水稻玉米等作物则略微缺乏（刘书起等 1991，胡艳华 马贵书 2016），茶树种植区域有效磷数值处于适量状态（阮建云等 2020）。

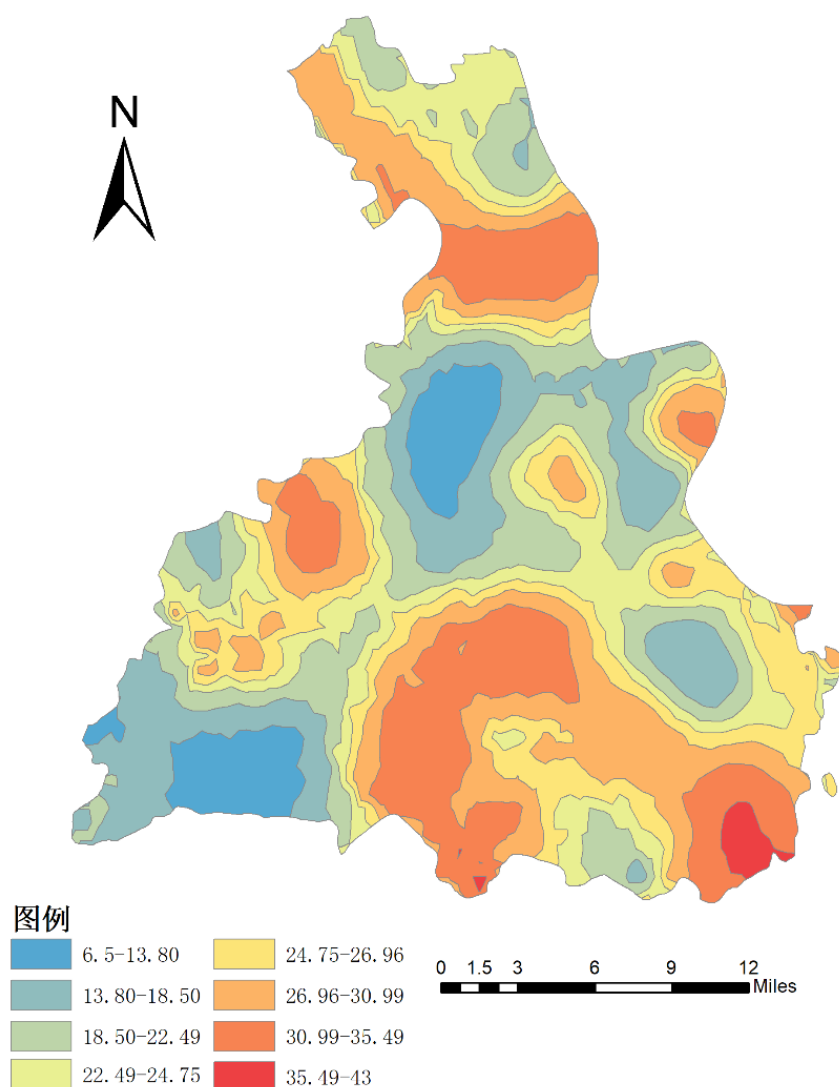


图 6 土壤有效磷含量的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of soil available phosphorus content

3.3 景观条件对土壤养分的影响

景观包括自然景观和人文景观两部分，内涵十分丰富，因此景观条件也包括许多方面，其中有地形、气候等自然条件，也有农田种植制度、种植作物类型等人为条件。实验半变异函数理论模型的参数表明当地土壤有效磷含量数据的空间变异受结构性因素影响较小，但是仍然会受到一部分结构性因素作用，并且由于施肥情况等信息难以搜集或分析其相关性，所以选取景观条件时依旧以自然景观条件为主来分析对土壤有效磷含量的影响。相关性检验方法采用皮尔逊（Pearson）相关性系数进行判断，当相关系数的绝对值大于 0.3 时则可认为两变量之间具有一定的相关性。

3.3.1 土壤有效磷与地形相关性分析

研究区地处过渡地带，西南部属于鄂西山区，东北部属于江汉平原，地形较复杂，因此地形因子对土壤有效磷含量的影响较大。相关地形因子利用 DEM 数据处理得到，包括高程、坡度与坡向。在表 6 中计算了这三个因子与有效磷含量的相关系数。其中除坡向与有效磷含量的相关性较小以外，高程、坡度都与有效磷含量有一定的负相关关系。

土壤有效磷含量总体随海拔高度的变化不大，随着海拔高度的增加，有效磷含量变得越来越低，这可能是由于海拔较高的区域处于西南山区，受到地形影响，阻挡了北部吹来的暖湿空气，形成准静止锋，然后上部温度较低的空气顺着山坡下沉，底部暖空气上升产生对流从而形成降雨，造成了山地整体气温较低以及湿度较大(白雨诗等 2020)。因此低温多湿的土壤降低了其中的化学反应速率，使微生物的活性减弱，导致总磷转换为有效磷的效率降低(李裕元 2001)。坡度与土壤有效磷呈现负相关关系，即坡度越大，有效磷含量越少，这主要是因为坡度较大的区域遇到降雨后，会形成地表径流冲刷土壤，导致土壤养分的流失(张伟等 2007)。因此，有效磷含量随着坡度的升高而缓缓降低。

表 6 土壤有效磷与部分景观因子间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between soil available phosphorus and some landscape factors

| | 有效磷 | 高程 | 坡度 | 坡向 | 降雨量 |
|-----|--------|---------|----------|--------|-----|
| 有效磷 | 1 | | | | |
| 高程 | -0.187 | 1 | | | |
| 坡度 | -0.109 | 0.455** | 1 | | |
| 坡向 | 0.015 | 0.153* | 0.011 | 1 | |
| 降雨量 | 0.230* | 0.654** | -0.334** | -0.090 | 1 |

注：**表示 $P < 0.01$ ，*表示 $P < 0.05$ 。

3.3.2 土壤有效磷与气候相关性分析

水热条件也是一种影响土壤有效磷含量的重要因素，研究区的气候属于亚热带季风气候，雨热同期，研究采用主要的指标为年平均降雨量。由表 6 中可以看出年

平均降雨量与有效磷和高程均呈现显著的正相关。

水热条件从两方面影响土壤有效磷含量。一方面是温度，在适宜的温度下，土壤有效磷含量较高，但是当温度较高或较低时，土壤有效磷含量则都会降低；另一方面是水分，在一般情况下，如果是相同的土壤结构，那么土壤中的水分越多，则有效磷的含量越高(次仁等 2020)。这可能是因为适量降水一方面促进了植物生长，使得秋冬季节形成的枯枝落叶层较厚，被植被利用的速率较低，积累了大量的营养元素；另一方面样点均位于田地或林地，在农业生产中肥料的施放非常关键，适当的降雨可以把土壤表面的肥料溶解至土壤中，补充被农作物消耗的有效磷。因此在研究区内，降雨量处于适宜区间内时，土壤有效磷含量就会随降雨量增加而增加。

3.3.3 土壤有效磷与其他景观条件的相关性分析

除去地形、气候因素以外，还有许多景观条件可能与土壤有效磷含量有关，但是不易计算相关系数，所以根据速效磷含量的范围与这些景观条件进行相关度的分析。因为景观条件复杂繁多，所以选取了比较有代表性的成土母质和主要种植作物作为本实验分析的景观要素。本实验的研究对象为土壤有效磷含量，因此成土母质是一个重要的影响因素；此外所有样点均为农业用地，因此主要种植作物是最直接的景观条件。这两种景观条件的土壤有效磷含量特征如表 7。

表 7 不同土壤类型与主栽作物类型的有效磷含量特征

Table 7 Characteristics of available phosphorus content in different soil types and main crop types

| 景观条件 | 类别 | 样点数 | 速效磷均值 (mg/kg) |
|------|----------|-----|---------------|
| 成土母质 | 第四纪黏土 | 56 | 25.57±18.10 |
| | 河湖冲（沉）积物 | 18 | 24.65±10.21 |
| | 红砂岩类风化物 | 2 | 21.70±0.00 |
| | 泥质岩类风化物 | 30 | 26.03±16.57 |
| | 砂岩类风化物 | 1 | 14.90±0.00 |
| | 碳酸盐类风化物 | 99 | 24.83±19.17 |
| | 紫色岩类风化物 | 7 | 23.78±4.78 |
| | 主栽作物类型 | | |
| | 柑橘 | 66 | 25.23±20.21 |
| | 茶叶 | 35 | 22.80±12.53 |
| | 玉米 | 42 | 24.13±12.78 |
| | 水稻 | 14 | 27.27±11.54 |
| | 油菜 | 53 | 22.81±15.03 |

研究区采样点的成土母质主要有四种，第四纪黏土、河湖冲（沉）积物、泥质

岩类风化物、碳酸盐类风化物。总体来看，它们有效磷水平为泥质岩类风化物>第四纪黏土>碳酸盐类风化物>河湖冲（沉）积物。而不同的主栽作物中，种植柑橘与水稻的土壤有效磷含量较高，种植茶叶和油菜的土壤有效磷含量较低，并且各个样点值的离散程度较大。这可能是由于水稻种植需要得磷养分较多，并且地处平原距离城市较近，管理与施肥比较方便。样点值的离散程度大可能是因为研究区农田数量过多，管理措施与施肥方式非常不统一。是因为这也符合前文半方差分析时得出的结论，当地土壤有效磷同时受到结构性因素与随机性因素的影响，并且随机性因素占据主导作用。

3.4 有效磷含量预测

3.4.1 预测模型构建

利用 MLR 与 GWR 这两种方法对土壤有效磷数据建立预测模型，从 230 个样点数据中选择 161 个样点用于模型构建，69 个样点作为验证集数据用于精度评价。由单因子的相关性分析结果选择高程、全氮这两个与有效磷相关性最高的因子作为自变量来构建模型进行预测，并且利用 PMK 方法添加成土母质作为区域性变量来提高预测模型的精度。

对于 MLR 模型，得到的回归方程为：

$$y = 1.486x_1 - 0.003x_2 + 22.836$$

式中： y 为有效磷含量， x_1 为坡度， x_2 为高程。

对于 GWR 模型，选择与 MLR 模型相同的自变量，模型参数如表 8 所示。

表 8 地理加权回归模型预测参数统计

| Table 5 Prediction parameter statistics of geographically weighted regression model | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|----------|-------|
| 变量 | 最小值 | 最大值 | 中值 | Moran 指数 | P 值 |
| 截距 | 20.545 | 25.229 | 22.067 | 0.774 | 0.000 |
| 高程 | -0.008 | 0.012 | 0.003 | 0.535 | 0.000 |
| 全氮 | -0.369 | 3.238 | 1.577 | 0.111 | 0.000 |

3. 4. 2 空间分布与精度比较

分别按照预测集样点得出的预测模型进行空间插值，利用普通克里格（OK）插值的结果分别对比分析 MLR、GWR 和结合了成土母质信息的预测结果的空间分布，如图 7 所示。四个模型均体现出了土壤有效磷西南低、东北高的趋势，MLR 与 GWR 模型都比较平滑，但是选的因子不太恰当，原本考虑将施肥量作为一种影响因子加入预测模型，但是由于数据难以获取，所以未能加入模型构建。

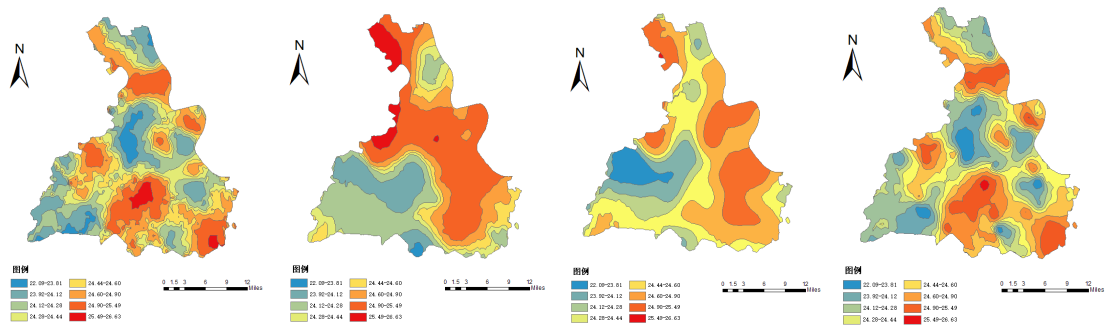


图 7 不同模型预测土壤有效磷空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of soil available phosphorus predicted by different models

利用提前挑选出的 69 个点进行精度评价。MLR 与 GWR 模型的相关系数较小，这种情况的形成主要是由于一方面数据间存在相关性没有去除，另一方面所选择的因子与有效磷相关性较小，所以预测结果精度不高。成土母质与施肥量数据对土壤有效磷含量影响较大，但是未加入至模型中导致预测模型的精度效果较差。PMK 方法将母质添加至预测模型内，可以看到预测结果精度对比 MLR 和 GWR 方法显著提高，相关系数为 0.351，考虑到研究区域较大，所以该模型在一定程度上可以预测研究区内的有效磷分布。

表 9 土壤有效磷预测方法精度指标对比

| Table 9 Comparison of precision indexes of soil available phosphorus prediction methods | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-------|
| 方法 | 平均误差 | 均方根误差 | 相关系数 |
| OK | 0.92 | 62.75 | 0.312 |
| MLR | 1.42 | 71.28 | 0.131 |
| GWR | 1.34 | 67.95 | 0.176 |
| PMK | 1.12 | 63.05 | 0.351 |

4 总结与讨论

4.1 讨论

本研究采用地统计学方法与 GIS 技术相结合的方式,研究了宜都市土壤有效磷的空间分布情况,同时根据实际情况选择了 6 个景观条件作为影响因子分析了与土壤有效磷的相关性。总体来说,半方差函数拟合、空间插值与相关性的研究结果均不佳。这可能是由于研究区域太大,采样点仅有 230 个,平均每个村庄有 2 个,而村庄内农业用地数量显然远大于 2。所以,半方差函数拟合效果与空间插值结果不佳。并且由于景观条件选择的大多还是自然景观要素如高程、坡度和坡向,但是半方差函数拟合参数得出的结论是随机性变量占据有效磷含量空间变异的主体。所以,土壤有效磷含量与这些景观条件间的相关性研究结果也不理想,只有降雨量数据呈现显著正相关。

景观是受到人类与自然共同影响所表现出的一个综合体,农业生产更是人类改造自然使其满足人类自身发展的一项活动。因此耕地或林地内的土壤养分含量受到人类活动的影响较强,例如不同种植制度、不同轮作类型、不同肥料的施放等等(董悦等 2018)。这些人类活动同时也会受到自然条件的限制,例如本研究中山区主要种植的作物为柑橘与茶树,而城市郊区或临近城市的土地大多种植了水稻、玉米等作物。并且,坡度和高程也影响了采样点的分布,在东北方向上样点密度明显大于西南方向,这是因为西南方是鄂西山地,地形复杂不适宜人类种植农作物。

水热条件在本研究中是影响土壤有效磷含量的主要结构性因素。研究中采用了 2018 年的降雨量数据作为量化指标来计算与土壤有效磷含量的相关性。有研究表明随着高程增加,土壤有效磷含量会由于低温多湿导致微生物活动减弱,对有机磷的分解速度变慢而降低(黄金华等 2016)同时也有研究表明随着高程增长有效磷含量呈现波浪式下降(王月等 2019)。在本研究中,随着高程的增长土壤有效磷含量不断降低,这与两者的结果相一致,即采样点大多数处于有效磷含量随高程增加而下降的地段。

对于人为因素如肥料施用情况数据不易获取导致这部分相关性难以分析。而恰好磷素是一种空间变异性较强的土壤养分,同时它也更易受到不均匀施肥、种植方法等人类农业生产活动的影响(张伟等 2007)。因此预测模型只能在一定程度上揭

示不同景观条件下的土壤有效磷的分布特征。

除了土壤有效磷含量更易受不均匀施肥等随机性因素的影响外，造成研究结果未能达到预期的另一部分原因在于数据量较小而研究区域太大，并且研究区处于鄂西山地与江汉平原的过渡地带，西南山地与东北丘陵间的差异较大，干扰了景观要素与土壤有效磷含量的相关关系。所以如果按照地形将研究区域分为两大部分，一部分主要为城市和郊区，另一部分主要为山地。这样做或许能降低一部分种植制度和不均匀施肥带来的随机性影响，从而增加自然景观条件对土壤有效磷的影响程度。但是随之而来的问题是可能干扰或掩盖真正对有效磷含量造成影响的景观条件。

总而言之，通过对该区域的有效磷含量空间分布的分析，可以得知该区域大部分土壤有效磷含量处于适宜状态。在此对于小部分磷素缺乏的地区提出两点建议。第一，施放磷肥时可与有机肥混合，有助于土壤有效磷含量的升高(庞荣丽等 2006)。第二，对于主要位于西南山地的坡度较大的区域，施肥时要尽量深施以防止地表径流冲刷土壤造成肥力流失(王艳语和许秀成 2017)。

4.2 结论

4.2.1 空间分布特征

整个研究区土壤有效磷含量在 4.2~48mg/kg 之间，大部分区域拥有适宜的磷素水平，小部分地区缺乏有效磷，需要针对性的补充有效磷。土壤有效磷含量变异系数为 38%，整体变异性较强，受到外界因素影响比较强烈。 $C_0/(C_0 + C)$ 为 0.73，表明土壤有效磷含量拥有中等程度的空间自相关性，其中随机性影响占总体空间变异的 73%。

趋势分析的结果显示研究区土壤有效磷含量在东西、南北两个方向上均有较明显的二阶趋势，最终利用克里格插值得到土壤有效磷含量分布图，图中显示土壤有效磷在北部与东南部含量较高，在西南部与中心区域的含量较低。

4.2.2 相关性

基于 DEM 提取出的地形因子中高程、坡度与土壤有效磷含量有一定的相关关系，其中土壤有效磷含量随高程的增加而降低，随坡度的增加而降低。在其他自然

因素中降雨量与土壤有效磷含量呈显著正相关关系。

另外两个变量主栽作物类型和成土母质对有效磷含量的影响较小。其中主栽作物类型对有效磷含量有一些影响，种植水稻的土壤样点有效磷含量较高，种植茶树的土壤有效磷含量较低。不同成土母质生成的土壤有效磷水平为泥质岩类风化物>第四纪黏土>碳酸盐类风化物>河湖冲（沉）积物。

4.2.3 预测模型

以普通克里格插值结果为参照，分别采用 MLR 与 GWR 模型和 PMK 方法对土壤有效磷进行了预测，结果显示 PMK 方法对于土壤有效磷含量的预测精度最高，能在一定程度上预测研究区域内的有效磷空间分布。

4.3 展望

本研究基于 GIS 技术与地统计学方法研究了土壤有效磷空间变异性以及空间分布特征，但是对于土壤有效磷空间分布的影响因子研究主要集中于地形因子，对于人文经济方面的因素考虑还不够充足。这很大程度是由于相关数据的搜集与分析难度较大，并且结果也不是非常理想。随着未来空间大数据、WebGIS、3S 技术的迅速发展，能够采集更多的土壤数据，考虑更复杂多样的土壤养分影响因素，会有更全面、精确的模型进行分析预测，最终为我国农业的发展提供更准确的科学依据。

参考文献

1. 白雨诗, 刘目兴, 易军, 张海林, 姜淑兰, 黄建武, 万金红. 三峡山地沟谷不同坡位土壤水分特征及对降雨过程的响应. 长江流域资源与环境, 2020, 29 (10): 2261-2273.
2. 次仁, 徐雪超, 赵茜茜. 拉萨周边自然土壤有效磷的空间分布特征研究. 西藏科技, 2020 (04): 29-32.
3. 段丽君, 张海涛, 郭龙, 杜佩颖, 陈可, 琚清兰. 典型柑橘种植区土壤有机质空间分布与含量预测. 华中农业大学学报, 2019, 38(01): 73-81.
4. 董悦, 张永清, 刘彩彩. 晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性. 生态学报, 2018, 38 (23): 8621-8629.
5. 郭龙, 张海涛, 陈家赢, 李锐娟, 秦聪. 基于协同克里格插值和地理加权回归模型的土壤属性空间预测比较. 土壤学报, 2012, 49(05): 1037-1042.
6. 胡艳华, 马贵书. 油菜耕地土壤养分状况及施肥建议. 云南农业, 2016 (01): 50-52.
7. 黄金华, 叶代全, 张志才, 何祯祥, 成向荣. 光皮树幼林坡地土壤养分空间异质性和分布格局研究. 西南林业大学学报, 2016, 36 (04): 30-35.
8. 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 冯舒, 熊小波, 梁国付. 基于 GIS 和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异——以周口为例. 应用生态学报, 2016, 27 (04): 1211-1220.
9. 李松伟, 邓烈, 何绍兰, 易时来, 谢让金, 郑永强, 吕强, 田喜. 基于小尺度的山地柑橘园土壤有效磷空间分布状况研究. 果树学报, 2014, 31 (01): 45-51+165.
10. 李旭, 王海燕, 丁国栋, 刘玲, 任丽娜, 杨晓娟. 华北土石山区森林土壤养分空间变异研究. 干旱区资源与环境, 2014, 28 (06): 136-142.
11. 李裕元, 邵明安, 张兴昌. 侵蚀条件下坡地土壤水分与有效磷的空间分布特征. 水土保持学报, 2001 (02): 41-44.
12. 刘书起, 甄英肖. 土壤有效氮、磷强度变化对水稻产量的影响. 河北农业大学学报, 1991 (01): 23-27.
13. 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, 2003 (01): 4-8.

14. 马进川. 我国农田磷素平衡的时空变化与高效利用途径. 中国农业科学院, 2018.
15. 庞荣丽, 介晓磊, 谭金芳, 王宜伦. 低分子量有机酸对不同合成磷源的释磷效应. 土壤通报, 2006 (05): 941-944.
16. 秦富仓, 刘力川, 杨振奇, 牛晓乐, 李晓琴. 阿荣旗地形对耕地养分的影响研究. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (06): 35-40.
17. 阮建云, 马立锋, 伊晓云, 石元值, 倪康, 刘美雅, 张群锋. 茶树养分综合管理与减肥增效技术研究. 茶叶科学, 2020, 40 (01): 85-95.
18. 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展. 中国土壤与肥料, 2011 (02): 1-9.
19. 唐新明, 李世金, 李涛, 高延东, 张书毕, 陈乾福, 张祥. 全球数字高程产品概述. 遥感学报, 2021, 25 (01): 167-181.
20. 王月, 房云清, 纪婧, 秦弋丰, 马瑞君, 李旭东. 不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律. 农业资源与环境学报, 2019, 36 (06): 814-821.
21. 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 高等教育出版社, 2007: 266.
22. 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系. 自然资源学报, 2015, 30 (05): 858-869.
23. 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. 生态学报, 1997 (05): 3-11.
24. 杨家慧, 谭伟, 冯艳. 马尾松人工林土壤养分空间分布特征及其与地形因子的相关性分析. 西南林业大学学报 (自然科学), 2020, 40 (04): 23-29.
25. 杨帅, 胡保健, 胡占占, 张志号. 对 ASTER GDEM 数字高程模型的精度评价及修正. 北京测绘, 2021, 35 (02): 161-165.
26. 杨之江, 陈效民, 景峰, 郭碧林, 林高哲. 基于 GIS 和地统计学的稻田土壤养分与重金属空间变异. 应用生态学报, 2018, 29 (06): 1893-1901.
27. 张敏, 贺鹏飞, 陈伟强. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异分析. 东北农业大学学报, 2010, 41 (03): 53-58+161.
28. 张倩, 韩贵琳, 柳满, 阳昆桦, 刘强. 贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素. 生态学杂志, 2019, 38 (02): 321-328.

29. 张伟, 陈洪松, 王克林, 侯娅, 张继光. 桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异. 生态学报, 2007 (12): 5168-5175.
30. 张维理, 徐爱国, 张认连, 冀宏杰. 土壤分类研究回顾与中国土壤分类系统的修编. 中国农业科学, 2014, 47 (16): 3214-3230.
31. 章跃芬. 多源卫星降水产品的时空精度评估及水文效应研究. 中国地质大学 (北京), 2020.
32. 赵玉涛, 余新晓, 关文彬. 景观异质性研究评述. 应用生态学报, 2002 (04): 495-500.
33. Andrea GV, Maja KS, David AW, Reiner G. Bioavailable soil phosphorus decreases with increasing elevation in a subarctic tundra landscape. PloS one, 014, (3).
34. Bogunovic IPP, Brevik EC. Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. Science of the Total Environment, 017, 84-585.
35. Estatira S, Gerard MC, Patrick R, Sarwar GG. Effect of glycosidation of isoflavones on their bioavailability and pharmacokinetics in aged male rats. Molecular nutrition & food research, 2009, 53 Suppl 1.
36. Li JR, Okin GS, Alvarez L, Epstein H. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. Biogeochemistry, 2008, 88(1).
37. Li Y, Chen Z, Zheng JH, Wang Q, Shen CC, Ge Y. Ectomycorrhizal fungi inoculation alleviates simulated acid rain effects on soil ammonia oxidizers and denitrifiers in Masson pine forest. Environmental Microbiology, 2019, 21(1).
38. Litaor MI, Seastedt TR, Walker MD, Carbone M, Townsend A. The biogeochemistry of phosphorus across an alpine topographic/snow gradient. Geoderma, 2004, 124(1).
39. Turner BL, Blackwell MSA. Isolating the influence of pH on the amounts and forms of soil organic phosphorus. European Journal of Soil Science, 2013, 64(2).
40. Yang X, Post WM, Thornton PE, Jain A. The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. Biogeosciences, 2013, 10(4).
41. Yu FZ, Zhang ZQ, Chen LQ, Wang JX, Shen ZP. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon in subtropical forests of mountain Lushan, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(9).

42. Zhou J, Wu YH, Bing HJ, Yang ZJ, Wang JP, Sun HY, Sun SQ, Luo J. Variations in soil phosphorus biogeochemistry across six vegetation types along an altitudinal gradient in SW China. *Catena*, 2016, 142.
43. Zuo XA, Zhao XY, Zhao HL, Guo YR, Zhang TH, Cui JY. Spatial pattern and heterogeneity of soil organic carbon and nitrogen in sand dunes related to vegetation change and geomorphic position in Horqin Sandy Land, Northern China. *Environmental monitoring and assessment*, 2010, 164(1-4).

致 谢

转眼间四年时光已如滚滚长江东逝水，细数往事历历在目，奔跑在南湖畔樱花如雨，漫步在梧桐路绿树成荫，匆匆过红砖墙边落叶纷飞，湖心亭凭栏遥看落雪红梅。又是一年的盛夏，又是一年的毕业季，四年的大学生涯终究要划上一个句号。谨以此篇献给郁郁苍苍的华农、博学多识的老师、热情友善的同学和我四年的青春。我要感谢培养我四年的华中农业大学。狮山幽幽，南湖粼粼，美丽的华农培育了我强健的身体，智慧的头脑。

首先要感谢的是我的导师张海涛老师，论文定题到写作定稿，倾注了张老师很多的心血。在大学期间上过张老师的资源调查课程，这门课不仅是理论课也是一门实践课程。在课堂上，在贺胜桥，在毕业论文的写作里，张老师用十足的耐心为我答疑解惑，关怀备至。在此向张老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

感谢实验室的武学妍师姐为我的毕业论文提供的帮助。我论文的实验设计、实验实施和撰写，每一步都有武师姐为提供指导；在实验之余，在生活上还很关心我。

在大学里最快乐的时光无非是遇到了 4 个好室友，他们分别是杨青松、牟林榛、肖焱彬、邹志鑫。无论遇到什么困难他们总能给我鼓励，激励着我。我们互帮互助，一起承担一起欢笑。他们也都考上了自己心仪的大学开始了研究生生活。在此祝愿他们前程似锦，一路顺风。

感谢我的父母和家人，尤其是我的妈妈，无论什么时候，什么话都可以向她倾诉，是我人生路上的坚实后盾。

最后，祝福在华农遇到的所有老师、同学、朋友当然还有陪伴了四年的室友，衷心祝福你们！