

基于熵权 TOPSIS 模型和 GIS 的黔北农产品区 土壤养分空间分析及综合评价

王 历^{1,3}, 周忠发^{2,3}, 牛颖超^{1,3}, 冯 倩^{1,3}, 但雨生^{1,3}

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学 地理与环境科学学院/喀斯特研究院, 贵阳 550001; 3. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001)

摘 要:通过实地采样和室内分析的方法,对黔北农产品区农用地 1 037 个土壤样品进行了检测分析,以全氮、有效磷、速效钾、有机质、pH 值为评价指标,运用 GIS、GS+ 技术和熵权 TOPSIS 模型法对农产品区的土壤养分进行了分析与综合评价。结果表明:(1) 研究区土壤速效钾含量丰富,全氮、有效磷含量为中等,土壤为酸性与中性土壤,较适合农作物生长,但其有机质含量相对缺乏。(2) 半方差函数模型拟合结果显示有机质、速效钾、全氮、pH 值符合指数模型,有效磷符合球状模型,而有机质、速效钾的空间变异结构特征较强,全氮、pH 值、有效磷的空间变异结构性弱。(3) 研究区土壤养分综合指数空间分布图分析显示,北部和西部地区共 2.55% 的面积为极高水平,以岛状为主;西南、东南、南及北部地区共 32.43% 的面积为高水平,以带状为主;研究区 55.45% 的面积为中等水平,集中连片,以面状为主;西部、中部、东部部分区域共 9.45% 的面积为低水平,以带状和岛状为主;0.11% 的面积为极低水平。研究结果为掌握黔北农产品区养分丰缺状况、变异机理、空间分布和为其精准施肥奠定了基础。

关键词:黔北农产品区; 土壤养分; 熵权 TOPSIS 模型; 空间特征

中图分类号:S158

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0274-09

Spatial Analysis and Comprehensive Evaluation on Soil Nutrients in Northern Guizhou Agricultural Product Area Based on Entropy Weight-TOPSIS and GIS

WANG Li^{1,3}, ZHOU Zhongfa^{2,3}, NIU Yingchao^{1,3}, FENG Qian^{1,3}, DAN Yusheng^{1,3}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. School of Geography & Environmental Science/School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: About 1 037 farmland soil samples from the agricultural product areas of Qianbei were analyzed. pH value, total N, available P, available K, organic matter were used as the indicators, the nutrients of soil samples of agricultural product areas were analyzed and evaluated with GIS, GS+ technology and entropy TOPSIS model. The results showed that: (1) in the study area, the soils were acidic or neutral, with abundant available K, medium total N, available P and relatively low organic matter, which is suitable for crop growth; (2) the semi-variance function models proposed that the organic matter, available K, total N, pH value fitted the exponential model and available P fitted spherical model, as well as the spatial variability structure of organic matter, available K were strong, and pH value, total N, available P were relatively weak; (3) the spatial distribution map of soil nutrient index showed that 2.55% of the area in the northern and western regions is high level with the island distribution; 32.43% of the area of the southwest, southeast, south and north regions was high level with band distribution; 55.45% of the study area was medium level, with the concentrated and surface distributions; 9.45% of the western, central and eastern part of the region was low level, with banded and island distributions, and the 0.11% of study area was very low. The

收稿日期:2017-08-16

修回日期:2017-09-17

资助项目:国家自然科学基金(41661088);贵州省高层次创新型人才培养计划“百”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5674);贵州省科技计划(黔科合 GY 字[2015]3001);贵州省国内一流学科建设(黔教科研发[2017]85 号);国家遥感中心贵州分部平台建设项目(黔科合计 Z 字[2012]4003)

第一作者:王历(1991—),男,四川绵阳人,硕士研究生,研究方向为地理信息系统与遥感。E-mail:827544609@qq.com

通信作者:周忠发(1969—),男,贵州遵义人,教授,主要从事地理信息系统与遥感研究。E-mail:fa6897@163.com

results lay the foundation for mastering the nutrient abundance, the variation mechanism, the spatial distribution and the precise fertilization for the agricultural product areas in the north of Guizhou Province.

Keywords: north Guizhou agricultural area; soil nutrient; entropy TOPSIS model; spatial structure

土壤养分是成土母质、气候、地形和生物等自然因素和人类活动共同作用的结果,是土壤生态功能中最重要的组成部分,其含量是衡量土壤肥力程度的量化指标,是植物生长发育的基础^[1-2],土壤养分的高低决定了作物的生产潜力。土壤养分在生态系统中受系统因素和随机因素的共同作用使得土壤具有空间异质性。而分析、预测土壤养分空间变异性及空间分布,开展区域土壤养分综合评价是土地可持续利用的重要组成部分^[3],对农作物的精准施肥,土壤的利用与改良,农业生态系统的可持续性具有重要意义。目前,中国大部分地区土壤均出现不同程度的肥力退化现象^[4],科学、合理地分析与评价土壤肥力可以更好地利用土地资源,可为科学施肥、作物布局调整以及土地开发整理等提供科学的依据^[5]。

地统计学是以区域化变量理论为基础的数学工具,不仅能揭示属性变量的空间分布、空间变异及相关特征,而且能将空间格局与生态过程联系起来,可有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响^[2]。目前,国内外学者应用地统计方法在不同尺度上对土壤养分空间变异规律进行了研究,如 Tesfahuneg 等^[6]在流域尺度基础上研究了埃塞俄比亚北部特定管理下土壤属性的空间变异性;Bogunovic 等^[7]基于地统计方法和样条基函数插值法研究了小尺度的砂质土壤的养分空间变异;Oueslati 等^[8]对意大利植被和土壤有机碳的空间变异进行了研究,但并未提及及其他土壤养分;吕真真等^[9]从大尺度上研究环渤海沿海区域不同土层土壤养分空间变异和分布;Zhang 等^[10]结合地统计学和 GIS 技术,研究了爱尔兰东南部草原地区土壤有机碳的空间分布特征。上述研究基于 GIS 技术与不同研究方法相结合对土壤养分的空间变异特征进行研究,为更好地综合评价土壤养分状况奠定了基础。在土壤养分综合评价方法的研究中,国内外研究学者更多偏向于应用数学模型和方法,如模糊综合评判法^[11]、主成分分析法^[12]、灰色关联法^[13]、投影寻踪综合评价法^[14]、神经网络法^[15]等方法,对土壤养分综合评价进行研究,使土壤养分评价趋于定量化。上述方法均有各自优点,但土壤养分是多指标因素的综合体系,其每个指标只能描述土壤养分的某一侧面^[16-17]。因此各单项指标评价结果是不相容的,使上述方法存在忽略各因子对土壤养分总体影响的问题^[18]。而熵权 TOPSIS 模型是熵权法与

TOPSIS 模型结合在一起的改进模型,是综合评价法中最新的研究成果^[19],不仅能客观描述各养分指标对土壤综合肥力贡献的重要程度,而且避免了人为因素的主观性,提高了评价结果的精度和客观性。

黔北地区是贵州省重要的粮食和特色农产品生产基地,素有“黔北粮仓”的美誉。土壤肥力的高低直接影响着该区域农产品种植的结构、布局和效益,对整个贵州省农产品产业发展也极具影响。因此,正确分析与评价该区域土壤的养分高低水平对于提出合理的施肥建议、充分发挥土壤潜力具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔北地区位于贵州省北部的遵义市,介于 27°8′—29°12′N,105°36′—108°13′E,地处云贵高原向湖南丘陵和四川盆地过渡的斜坡地带,位于云贵高原的东北部,地形起伏大,地貌类型复杂。平均海拔 1 000~1 600 m,在全国地势第二级阶梯上,国土总面积为 30 762 km²,其山间平坝面积占 7.4%,丘陵占 30.7%,山地占 61.9%。低山丘陵盆地区主要以黄壤、石灰土、水稻土为主;低中山地区主要以石灰土、紫色土为主;中高山地主要以黄棕壤为主,土壤性质以酸性和中性为主(图 1)。黔北地区季风环流交替,属典型的温暖、湿润亚热带季风高原山地气候,四季分明,雨热同季,无霜期长,年平均降水量 1 000~1 300 mm,年平均气温 13~18℃,光热水气条件较好,适宜农作物生长,是贵州省重要农产品生产基地,以茶叶、蔬菜辣椒、生态畜牧业、中药材、干鲜果为重点的“5 大主导产业”和以竹、烤烟、马铃薯、酒用高粱和特色食粮为主的“5 大特色产业”,素有“黔北粮仓”的美誉。

1.2 土壤样品采集与测定

采样区位于贵州省北部的黔北地区,囊括遵义市 14 个县区,面积 30 762 km²,土地利用方式主要以旱地为主。根据黔北地区的地形地貌、土壤类型和性质特点,以兼顾代表性与均匀性为原则,按照 NY/T 1634—2008《中国耕地地力调查与质量评价技术规范》^[20],运用 GPS 和 BDS 仪确定每一个中心样点的空间地理位置及海拔高度,每个中心样点周围设置 4 个辅助样点进行多点混合法采集表层(0—20 cm)土壤,并将土壤充分混匀后,去掉杂草、草根、砾石、砖

块、肥料团块等杂物后,用四分法留取 2 kg 土样带回室内作为中心采样点的土壤样品,经自然风干,碾磨后装袋以备分析,共计土壤样品 1 037 个(图 2)。

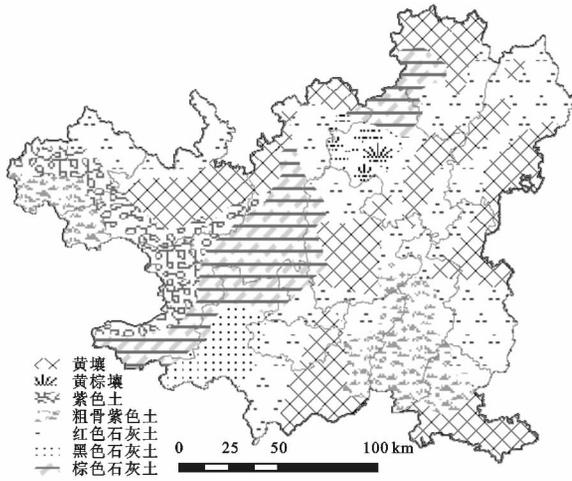


图 1 黔北地区土壤类型分布

样品理化性质测定:根据研究需要,土样的测定方法均采取常规分析测定方法。其中全氮采用半微量开氏消煮法—流动注射仪测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提—分光光度法;速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法;有机质采用重铬酸钾氧化—容量法测定;pH 值用 pH 值计测定^[21]。

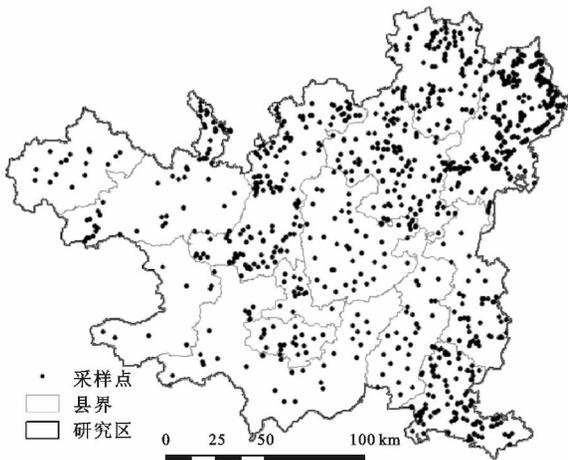


图 2 黔北地区及采样点分布

2 研究方法

2.1 熵权 TOPSIS 模型

TOPSIS 模型称为“逼近理想解排序方法”,是一种在系统分析决策中采用逼近于最优解的技术,确定评价对象的排序或等级的分析方法^[22]。核心思想是分析系统决策问题的最优解和最劣解的距离,最后计算各评价对象与最优方案的接近程度,按接近程度对各评价对象进行排序,确定评价效果^[23]。而权重是 TOPSIS 模型的重要参数,传统 TOPSIS 模型采用的权重指标法已不适合土壤养分元素研究。因此,对传

统 TOPSIS 模型进行改进,建立熵权 TOPSIS 模型,通过采用熵权法来确定评价指标权重值,进而再利用 TOPSIS 模型对评价对象进行优劣排序。熵权法是一种由待评价指标来确定指标权重的一种客观评价法,不仅能客观体现出各土壤养分指标对土壤综合肥力贡献的重要程度,而且能避免人为因素的主观性,提高结果的精度和客观性^[24-25]。熵权 TOPSIS 模型建立步骤如下^[26-27]:

(1) 评价指标同趋势化处理。通过将高优指标数据转化为低优指标数据,或将低优指标数据转化为高优指标数据,使得所有指标变化方向一致,即同趋势化处理,通常采用后一种方式。其转换公式如下:

$$X'_{ij} = 1/X_{ij} \quad (1)$$

式中: i 代表评价对象, $i=1,2,\dots,n$; j 代表评价指标, $j=1,2,\dots,m$ 。 X_{ij} 表示第 i 个评价对象在第 j 个指标上的取值; X'_{ij} 表示经倒数转换后的第 i 个评价对象在第 j 个指标上的取值。

(2) 归一化处理,建立归一化矩阵。

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2}} \quad (\text{原高优指标})$$

$$a_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X'_{ij})^2}} \quad (\text{原低优指标}) \quad (2)$$

经归一化处理后的 A 矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) 确定最优解向量和最劣解向量。

$$\text{最优解 } A^+ = (a_{11}^+, a_{12}^+, \dots, a_{1m}^+) \quad (4)$$

$$\text{最劣解 } A^- = (a_{11}^-, a_{12}^-, \dots, a_{1m}^-) \quad (5)$$

(4) 确定指标权重。

① 计算信息熵。

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$$

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{\ln n}$$

式中: H_j 为信息熵; p_{ij} 代表第 j 个指标下第 i 个对象的指标的比重。

② 计算熵权。

$$W_j = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^m (1-H_j)} \quad W_j \in [0,1] \quad (7)$$

(5) 计算欧式距离。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (a_{ij}^+ - a_{ij})^2} \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (a_{ij}^- - a_{ij})^2} \quad (9)$$

式中: D_i^+ 为最优解, D_i^- 为最劣解。

(6) 计算综合评价指数。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (10)$$

式中: $C_i \in [0, 1]$, C_i 愈接近 1, 表示该评价对象越接近最优水平; C_i 愈接近 0, 表示该评价对象越接近最劣水平。

2.2 地统计法

2.2.1 半方差函数模型 地统计分析的核心是根据样本点来确定研究对象(某一变量)随空间位置而变化的规律, 以此推算未知点的属性值^[28]。半方差函数是描述空间变量的关键函数, 它能描述变量的空间变异结构, 反映不同距离观测值之间的变化^[29]。其计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (11)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半变异函数; h 为两点空间距离; $N(h)$ 为间隔为 h 的样点数目。 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别为区域化变量 $Z(x_i)$ 在位置 x_i 和 x_i+h 处的实测值。半变异函数的理论模型有球状、高斯、指数、纯块金效应、幂函数、对数函数等模型。通过变异函数及曲线图可以得到 4 个重要参数, 即变程、基台值、块金值和分维数^[30]。

2.2.2 克里金插值法 克里金插值法是利用原始数据和半方差函数的结构特点, 对未知采样点区域化进行最优、无偏估计的一种方法^[28], 其计算公式如下:

表 1 土壤各养分指标的统计特征

肥力指标	样点数/个	分布类型	最大值	最小值	平均值	标准差	偏度系数	峰度系数	变异系数/%
全氮/(g·kg ⁻¹)	1037	正态	1.65	0.80	1.32	0.19	-0.30	2.29	14.39
有机质/(g·kg ⁻¹)	1037	对数正态	23.60	10.70	19.88	2.56	-0.68	2.81	12.88
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	1037	正态	13.60	8.00	10.47	1.62	0.29	1.93	15.47
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	1037	对数正态	291.00	124.00	169.74	39.85	0.96	3.14	23.48
pH 值	1037	正态	8.00	4.60	6.25	0.83	0.18	2.15	13.28

3.2 土壤养分含量空间特征分析

3.2.1 土壤养分含量空间变异结构特征 采用 GS+9.0 软件分析黔北农产品主产区土壤养分的半方差结构特征, 进而分析土壤养分的空间变异性程度, 经分析得出各土壤养分元素的半方差函数图及模型参数值(图 3、表 2)。而半方差函数是分析变量空间结构的重要工具, 通过方向和两点之间距离来反映变量的空间自相关性^[33]。半方差函数中离原点最近的数值称为块金值(Co), 反映的是最小采样尺度的非连续性变异及试验误差, 属于随机部分的空间异质

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (12)$$

式中: $Z(x_0)$ 表示未知样点值; $Z(x_i)$ 表示未知样点周围的已知点值; λ_i 为第 i 个样点的权重; N 表示样本数。

3 结果与分析

3.1 土壤养分的含量统计分析

根据全国二次土壤普查养分分级标准^[31], 将每个养分指标均分为 6 级水平, 分别为很丰富、丰富、中等、缺乏、很缺乏、极缺乏。对黔北地区 1 037 个采样点中的全氮、有机质、有效磷、速效钾和 pH 值 5 项指标进行描述性统计分析, 其结果见表 1。从土壤养分指标含量的变化范围来看, 全氮的含量变化范围为 0.80~1.65 g/kg; 有机质含量的变化范围是为 10.70~23.60 g/kg; 而有效磷、速效钾含量变化范围分别为 8.00~13.60, 124.00~291.00 mg/kg; pH 值为 4.60~8.00。从土壤养分指标含量均值和丰缺状况来看, 全氮含量的均值为 1.32 g/kg, 达中等丰富水平; 有机质含量均值为 19.88 g/kg, 处于缺乏状况; 而有效磷的均值为 10.47 mg/kg, 达中等丰富水平; 速效钾的均值为 169.74 mg/kg, 达到丰富水平; pH 值的均值为 6.25, 呈酸性。

依据变异系数的大小划分, 当变异系数 $C_v \leq 0.1$ 时为弱变异性, 当 $0.1 < C_v < 1$ 时为中等变异性, 当 $C_v \geq 1$ 时为强变异性^[32]。土壤速效钾的变异系数最大, 为 23.48%, 表明研究区土壤地块间差异较大; 其次是土壤有效磷, 为 15.47%; 有机质变异系数最小, 为 12.88%, 说明各个地块土壤有机质间差异性不大; 而土壤全氮和 pH 值的变异系数分别为 14.39% 和 13.28%。分析结果表明, 全氮、有机质、有效磷、速效钾、pH 值均为中等变异性强度。

性。基台值(Co+C)表示系统总变异性, 它是结构性变异和随机性变异的总和, 基台值越大, 系统总的空间异质性越高。块金系数(Co/Co+C)是块金值(Co)与基台值(Co+C)之间的比值, 反映土壤养分元素在一定范围内样点的空间自相关程度, 该比值 Co/Co+C 越大, 表明空间自相关性越弱, 当 Co/Co+C > 25% 时, 变量属于强烈空间自相关程度; 当 25% < Co/Co+C < 75% 时, 变量属于中等空间自相关程度; 当 Co/Co+C > 75% 时, 变量属于很弱空间自相关程度^[34-36]。变程是指变异函数在有限空间距离上达到

基台值时所对应的空间距离,即采样点的间隔距离。它表示在某种观测尺度下,空间相关性的作用范围,当样点间的距离越小,空间相关性越大^[37-38]。

从土壤养分来看,土壤全氮、有机质、有效磷、速效钾及 pH 值的块金系数分别为 12.11%,9.77%,6.86%,12.16%,10.34%,均具有强烈的空间自相关,表明研究区土壤养分元素在较大空间范围内表现出一致性,主要受内在因子的控制,如土壤母质、气候、地形、土壤类型因素。在变程上各土壤养分的空间相关距离为 1 800~7 800 m,说明在所研究的尺度上,各土壤养分含量具有良好的空间结构性,其速效钾的空间距离最大,有效磷和全氮的较大,有机质和 pH 值的最小。从表 2 中的半

表 2 土壤养分指标半方差函数模型参数

肥力指标	模型	块金值	基台值	变程/m	块金系数/%	R ²	残差
全氮/(g·kg ⁻¹)	E	0.0043	0.04	3800	12.11	0.32	1.123E-04
有机质/(g·kg ⁻¹)	E	0.64	6.55	1800	9.77	0.76	0.76
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	S	0.18	2.64	5500	6.86	0.08	0.02
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	E	0.02	0.154	7800	12.16	0.56	2.857E-04
pH 值	E	0.0018	0.02	2200	10.34	0.37	4.531E-06

3.2.2 土壤养分含量空间分布格局特征 通过 ArcGIS 10.1 地统计分析模块中的普通克里格插值法,并对平均值、均方根、标准平均值、标准均方根、平均标准误差等指标的比较,进行插值参数的校正和拟合模型的最优筛选,从而得到最精确的预测插值图(图 4)。

从空间分布图中可直观了解土壤养分各指标在研究区的分布情况。结果显示,研究区土壤养分含量空间分布呈明显态势。对于土壤全氮含量空间分布较为分散,在东北部、东部及中部地区含量明显高于其他区域,东北部地区主要分布在务川县东南部的石朝乡、丰乐镇等地,东部主要分布在涪潭北部、绥阳东部、正安南部、凤冈西部的交接区域,中部地区主要在绥阳县中部地带,全氮含量较高可能受农地利用方式的影响较大,高值区域主要种植茶叶、烤烟、辣椒、水稻等农作物。研究区北部全氮含量低,主要是旱地轮作为主,道真县分布比较集中。根据研究者的实地调研,农户对于蔬菜地和园艺植物用地的管理也因其施肥习惯以农家肥、堆肥为主而导致其氮素含量相对较高。而玉米—油菜轮作下的旱作方式则因土地通气条件较好,耕层有机质分解迅速,氮素流失相对容易,从而使得其氮素含量较低^[39-41]。有效磷含量整体含量较低,最大值区域处于中等水平,其空间分布较为均匀,呈现出由西部向中部递增的趋势,高值区域主要分布在黔北的中南部,集中在 10.79~13.60 mg/kg,沿桐梓县—绥阳县—汇川区—红花岗区—播州区呈带状

方差函数拟合模型可知,土壤有机质、速效钾模拟最优模型是指数模型,其决定系数分别为 0.76,0.56,有机质和速效钾较好反映了自身的空间变异结构特征,而全氮和 pH 值模拟最优也是指数模型,其决定系数分别为 0.32,0.37;而有效磷最优模型是球状模型,决定系数仅为 0.08,土壤各样点之间表现出较强的独立性和随机性,这既反映了在人类活动强烈影响和干扰下土壤养分性质空间变异的复杂性,同时也说明该采样密度未能有效反映土壤全氮、有效磷和 pH 值的空间变异结构,需要通过提高采样点密度、进行更小尺度的详细研究来反映土壤养分的空间变异结构,从而提高土壤样品采集的代表性和合理性。

分布,低值区域主要零星分布在赤水市的东北部,含量范围是 8.00~8.99 mg/kg,研究区大部分区域集中在中值区,含量 9.79~10.79 mg/kg,呈面状连片分布。而有效磷的含量空间分布格局与含量值高低与土壤类型分布规律有关,研究区主要以黄壤、黄棕壤、紫色土及石灰土等酸性和中性为主。由于酸性土壤中存在大量游离氧化铁,很大一部分磷酸铁被氧化铁薄膜包裹成为闭蓄态磷,磷的有效性大大降低^[42]。速效钾含量富集程度较好,集中分布在 150~190 mg/kg,丰富水平达 58.52%,但空间分布比较分散,含量高的区域主要以孤立零散的面状分布为主,位于研究区内的赤水市、习水县、桐梓县等地,而研究区的北部、南部含量较低,主要集中在 124~150 mg/kg。对于土壤有机质来讲,空间分布较为均匀,呈现出由东部向西部递减的趋势,富集程度较低,80%处于中等水平以下,含量高的区域分布在以黄棕壤为主的东部,呈带状分布,含量低的区域分布在以紫色土为主的赤水市西部。而经研究显示,有机质含量与土壤类型分布规律有关,不同的土壤类型对有机质含量高低影响较大,有机质在主要类型土壤中含量高低顺序为黄棕壤>石灰土>黄壤>紫色土^[43]。对于土壤 pH 值,研究区土壤 pH 值分布在 4.60~8.00 之间,偏酸性,高 pH 值的区域主要发生在研究区西部,该部分主要分布为紫色土,西北部和东部小片区域 pH 值较低,对应土壤为黄壤、石灰土为主。将黔北地区的土

壤类型分布图(图 1)与土壤 pH 值分布图进行对比, 可发现土壤 pH 值受土壤类型的影响较大, 并与土壤类型的分布规律相似。

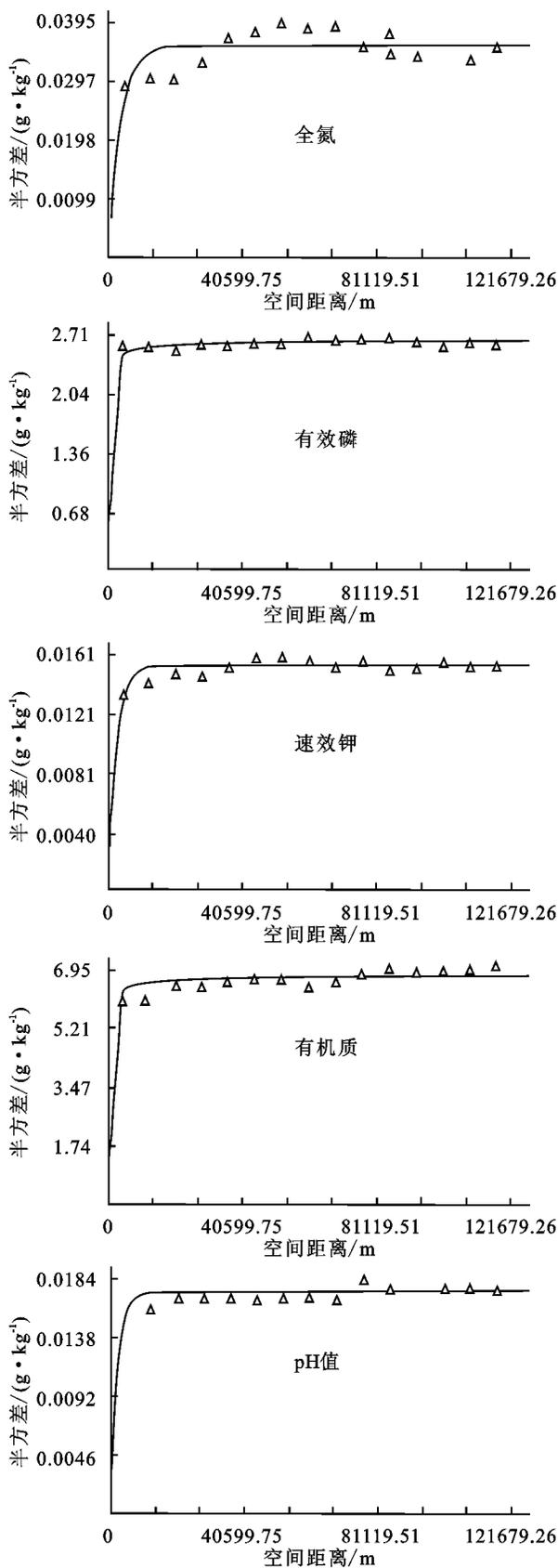


图 3 土壤养分含量半方差函数

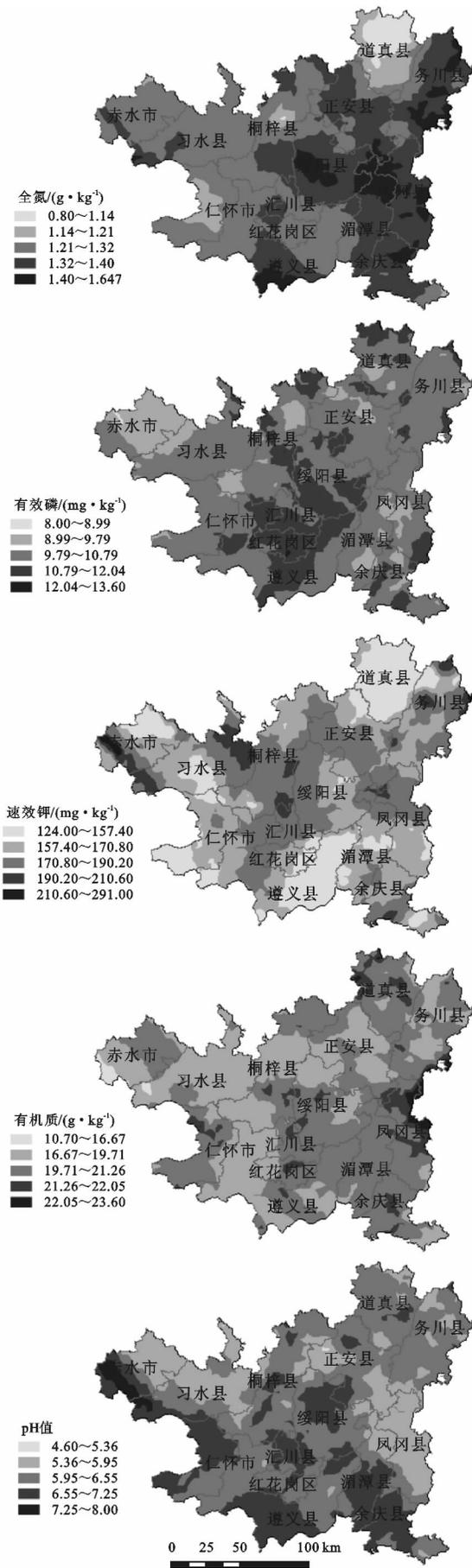


图 4 土壤养分指标含量空间分布

3.3 土壤养分综合评价

3.3.1 土壤养分综合指数空间格局评价 利用地统计空间插值模块,选取拟合最优的高斯模型对土壤养分综合评价指数(C_i)进行普通克里格插值,并运用自然间断点法将 C_i 分为 5 个等级^[44],分别为极高(0.78~0.95)、高(0.63~0.78)、中等(0.44~0.63)、低(0.18~0.44)和极低(0.02~0.18),最终得到土壤肥力等级分布图(图 5)。

从图 5 可看出,黔北地区土壤综合肥力的空间分布格局差异性显著。在北部和西部部分区域土壤肥力等级极高,主要分布在道真县的中部地区和习水县的南部,以独立的面状和带状形式呈现,其面积占 2.55%;在北部、西南部、南部和东南部部分地区土壤肥力等级高,主要分布在道真县周边外围地区,仁怀市及习水县交界地区,遵义、湄潭、凤冈、绥阳交界带分布最为集中,其他区域分布较为零散,其面积占 32.43%;中等土壤肥力空间分布最广,且集中连片,其面积占据了 55.45%;西部、中部、东部部分区域土壤肥力等级低,且集中分布在赤水市,桐梓县和绥阳县交界带,湄潭、凤冈、绥阳交界带的 3 个区域,分布较为明显,其面积占 9.45%;研究区极低的土壤肥力分布极少,其面积占 0.11%,

由于所在面积很小,所以插值后在空间上分布不明显。综上所述,黔北地区土壤肥力等级总体较高。

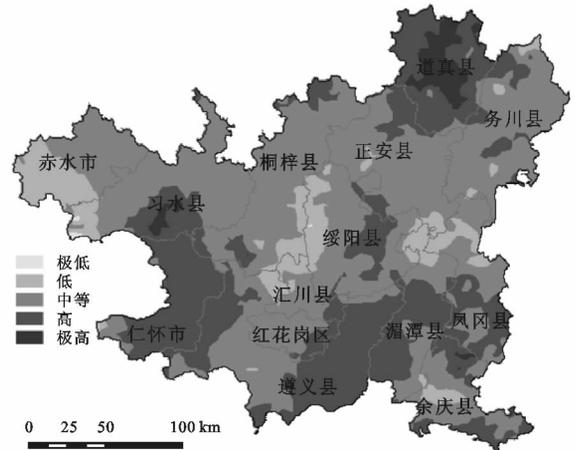


图 5 土壤养分综合评价

根据熵权 TOPSIS 模型的计算,从而获得各土壤养分的最优解和最劣解,再依据公式(8—9)计算出各土壤养分与最优解和最劣解的欧氏距离,得到土壤养分综合指数 C_i ,并进行描述性统计分析(表 3)。黔北地区的土壤养分综合指数(C_i)处于 0.02~0.95,平均值为 0.58,标准差为 0.26,变异系数为 44.69%,属中等变异程度。

表 3 土壤养分综合评价结果

综合评价结果	评价对象	分布类型	最大值	最小值	平均值	标准差	偏度系数	峰度系数	变异系数/%
C_i	1037	正太	0.95	0.02	0.58	0.26	-0.37	1.98	44.69

3.3.2 不同土壤类型的土壤养分评价 为了深入分析研究区土壤类型与土壤养分之间的相互关系,利用 ArcGIS 10.1 地理处理工具,将土壤肥力综合评价结果与土壤类型分布图进行叠加分析,得到不同土壤养分等级下各土壤类型的面积和占比(表 4)。

从表 4 分析结果可知,不同土壤类型下土壤肥力存在显著差异。黄壤在中等养分水平下所占面积

最大为 5 082.39 km²,占 57.91%,没有极低水平分布;黄棕壤、黑色石灰土、红色石灰土和棕色石灰土为中等肥力分布面积最大,面积为 741.64,772.32,6 411.88,1 863.14 km²,占比 90.16%,65.99%,68.40%,41.17%;紫色土和粗骨紫色土为高等土壤肥力分布面积最大,面积为 1 134.92,1 549.52 km²,占比为 4.08%,44.03%。

表 4 不同土壤类型下土壤养分统计

评价等级	黄壤	黄棕壤	紫色土	粗骨紫色土	红色石灰土	黑色石灰土	棕色石灰土
极高	401.47	0	53.36	1.66	150.34	0	178.51
高	3022.58	44.11	1134.92	1549.52	2202.46	397.89	1624.54
中等	5082.39	741.64	1105.97	1081.52	6411.88	772.32	1863.14
低	269.58	36.84	276.30	861.23	608.98	0	855.14
极低	0	0	4.17	25.39	0	0	4.15

4 结论

(1) 研究区土壤养分元素含量统计显示,研究区土壤速效钾的平均含量丰富,全氮、有效磷为中等丰富水平;有机质处于缺乏状况,pH 值的均值为 6.25,呈酸性,总体而言研究区土壤养分为中等水平。土壤

养分指标的变异程度为速效钾>有效磷>全氮>pH 值>有机质,其所有指标变异系数均小于 25%,为中等变异强度。

(2) 半方差函数模型拟合结果表明,土壤有机质、速效钾为指数模型,有较好的空间变异结构特征,而全氮和 pH 值同为指数模型,有效磷为球状模型,

但空间变异结构性弱,表明土壤各样点之间表现出较强的独立性和随机性,也反映了在人类活动强烈影响和干扰下土壤养分性质空间变异的复杂性。

(3) 地统计和普通克里格插值法得出研究区综合土壤养分空间分布图,显示出研究区总体土壤养分状况较好。北部和西部部分区域土壤养分等级极高,面积占 2.55%;北部、西南部、南部和东南部部分地区土壤养分等级高,面积占 32.43%;中等土壤养分空间分布最广,且集中连片,面积占 55.45%;土壤养分空间分布图的西部、中部、东部部分区域土壤养分等级低,面积占 9.45%;极低的土壤养分分布最少,面积占 0.11%。其研究结果对研究区农产品种植结构的合理布局,空间上科学施肥、土壤环境质量的改善和发挥土壤潜力具有十分重要的实际意义。

参考文献:

- [1] Mzuku M, Kbosla R, Reich R, et al. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2005,69(5):1572-1579.
- [2] 刘璐,曾馥平,宋同清,等.喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. *应用生态学报*, 2010,21(7):1667-1673.
- [3] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测:以陕西省横山县为例[J]. *土壤学报*, 2008,1(4):577-584.
- [4] 张桃林,王兴祥.土壤退化研究的进展与趋向[J]. *自然资源学报*, 2000,15(3):280-284.
- [5] 叶回春,张世文,黄元仿,等.北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J]. *中国农业科学*, 2013,46(15):3151-3160.
- [6] Tesfahunegn G B, Tamene L, Vlek P L G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011,117(6):124-139.
- [7] Bogunovic I, Mesic M, Zgorelec Z, et al. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014,144(4):174-183.
- [8] Oueslati I, Allamano P, Bonilaoio E, et al. Vegetation and topographic control on spatial variability of soil organic carbon[J]. *Pedosphere*, 2013,23(1):48-58.
- [9] 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):944-952.
- [10] Zhang C S, McGrath D. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods[J]. *Geoderma*, 2004,119(3/4):261-275.
- [11] 曾翔亮,董希斌,宋启亮,等.阔叶混交低质林诱导改造后土壤养分的模糊综合评价[J]. *东北林业大学学报*, 2013,41(9):50-53.
- [12] 杨劲松,姚荣江.苏北滩涂垦区土壤质量综合评价研究[J]. *中国生态农业学报*, 2009,17(3):410-415.
- [13] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等.基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. *农业工程学报*, 2010,26(4):100-105.
- [14] 王顺久,张欣莉,丁晶,等.投影寻踪聚类模型及其应用[J]. *长江科学院院报*, 2002,19(6):44-47.
- [15] 韩磊,李锐,朱会利.基于 BP 神经网络的土壤养分评价的综合模型[J]. *农业机械学报*, 2011,42(7):109-115.
- [16] 肖玖金,马红星,王莉,等.物元模型的川东北丘陵区土壤养分综合评价:基于以平昌县为例[J]. *江西农业大学学报*, 2011,33(2):381-387.
- [17] 汤洁,王晨野,李昭阳,等.基于物元模型的区域土壤养分评价[J]. *水土保持通报*, 2008,8(3):101-106.
- [18] 王晨野,汤洁,林年丰,等.物元模型在区域土壤养分评价中的应用[J]. *土壤通报*, 2009,40(5):1069-1075.
- [19] 杜挺,谢贤健,梁海艳,等.基于熵权 TOPSIS 和 GIS 的重庆市县域经济综合评价及空间分析[J]. *经济地理*, 2014,34(6):40-47.
- [20] 中华人民共和国农业部.中国耕地地力调查与质量评价技术规范 NY/T1634—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [21] 张韫.土壤、水、植物理化分析教程[M].北京:中国林业出版社,2011.
- [22] 陈伯扬. TOPSIS 法在土壤环境质量评价中的应用[J]. *现代地质*, 2008,22(6):1004-1009.
- [23] 李刚,迟国泰,程砚秋.基于熵权 TOPSIS 的人的全面发展评价模型及实证[J]. *系统工程学报*, 2011,26(3):400-407.
- [24] 程启月.评测指标权重确定的结构熵权法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010,30(7):1225-1228.
- [25] 张明华,郑元文.近 10 年来山东省区域经济发展差异时空演变及驱动力分析[J]. *经济地理*, 2013,33(1):79-85.
- [26] 张目,周宗放.基于粗集和熵权 TOPSIS 法的高新技术企业自主创新能力评价[J]. *数学的实践与认识*, 2008,38(24):52-58.
- [27] 李刚,迟国泰,程砚秋.基于熵权 TOPSIS 的人的全面发展评价模型及实证[J]. *系统工程学报*, 2011,26(3):400-407.
- [28] 牟乃夏,刘文宝,王海银,等. ArcGIS 10 地理信息系统教程:从初学到精通[M].北京:测绘出版社,2012.
- [29] 刘国顺,常栋,叶协锋,等.基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究[J]. *生态学报*, 2013,33(8):2586-2595.
- [30] 李海滨,工政权.空间异质性定量研究理论与方法[J]. *应用生态学报*, 1998,9(6):651-657.
- [31] 全国土壤普查办公室.全国第二次土壤普查暂行技术规范山[M].北京:农业出版社,1979.
- [32] 苏伟,聂宜民,胡晓洁,等.利用 Kriging 插值方法研究山东龙口北马镇农田土壤养分的空间变异[J]. *安徽农业大学学报*, 2004,31(1):76-81.

- [33] 庄腾飞,柳云龙,章立佳,等.上海城郊土壤重金属含量的空间变异与分布特征:以上海市闵行区为例[J].长江流域资源与环境,2012,21(S1):99-104.
- [34] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,58(5):1501-1511.
- [35] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等.基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以河北省遵化市为例[J].应用生态学报,2000,11(4):557-563.
- [36] Robertson G P, Klingsmith K M, Klug M J, et al. Soil resources, microbial activity and primary production across an agricultural ecosystem[J]. Ecological Applications, 1997,7(1):158-170.
- [37] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等.县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J].土壤学报,2003,40(1):79-88.
- [38] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M].北京:科学出版社,2006.
- [39] 胡玉福,邓良基,张世熔,等.川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及其影响因素研究[J].水土保持学报,2008,22(3):70-81.
- [40] Yang X L, Zhu B, Li Y L. Spatial and temporal patterns of soil nitrogen distribution under different land uses in a watershed in the hilly area of purple soil, China[J]. Journal of Mountain Science,2013,10(3):410-417.
- [41] Xue Z J, Cheng M, An S S. Soil nitrogen distributions for different uses and landscape positions in a small watershed on Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2013,60(11):204-213.
- [42] 李寿田,周健民,王火焰,等.不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究[J].土壤学报,2003,40(6):908-914.
- [43] 王晖,丁伟,许自成,等.贵州烟区紫色土与其他土壤类型养分特点的差异[J].贵州农业科学,2006,34(3):22-25.
- [44] 张彬,杨联安,冯武焕.基于改进 TOPSIS 和 COK 的土壤养分综合评价[J].干旱区资源与环境,2016,30(7):180-185.

(上接第 273 页)

- [6] Lauf S, Haase D, Kleinschmit B. Linkages between ecosystem services provisioning, urban growth and shrinkage: A modeling approach assessing ecosystem service trade-offs[J]. Ecological Indicators, 2014, 42(1809):73-94.
- [7] 魏慧,赵文武,张骁,等.基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价:以山东省德州市为[J].生态学报,2017,37(11):3830-3839.
- [8] 刘桂林,张落成,张倩.长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2014,34(12):3311-3319.
- [9] 郜红娟,韩会庆,俞洪燕,等.乌江流域重要生态系统服务地形梯度分布特征分析[J].生态科学,2016,35(5):154-159.
- [10] 易武英,苏维词.基于 RS 和 GIS 的乌江流域生态安全度变化评价[J].中国岩溶,2014,33(3):308-318.
- [11] 曹建华,袁道先,童立强,等.中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J].资源与生态学报,2015,6(4):247-256.
- [12] 韩会庆,蔡广鹏,郜红娟,等.基于生态敏感性和人类活动扰动强度的乌江源区生态补偿空间配置研究[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2017,35(4):17-22.
- [13] Luo G P, Yin C Y, Chen X, et al. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China[J]. Ecological Complexity, 2010,7(2):198-207.
- [14] Verburg P H, Britz W, Leip A. Modelling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011,142(1):40-50.
- [15] 谢莹,匡鸿海,吴晶晶,等.基于 CLUE-S 模型的重庆市渝北区土地利用变化动态模拟[J].长江流域资源与环境,2016,25(11):1729-1737.
- [16] Shoyama K, Yamagata Y. Predicting land-use change for biodiversity conservation and climate-change mitigation and its effect on ecosystem services in a watershed in Japan[J]. Ecosystem Services, 2014,8:25-34.
- [17] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [18] 郜红娟,罗绪强,韩会庆,等.贵州山区公路沿线生态系统服务价值变化[J].南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(1):135-141.
- [19] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. Global and Planetary Change, 2013,101(1):119-128.
- [20] 李正,王军,白中科,等.贵州省土地利用及其生态系统服务价值与灰色预测[J].地理科学进展,2012,31(5):577-583.