

基于地统计学的河南省封丘县土壤养分空间变异研究

肖燕¹, 吕喜军²

(1. 聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059; 2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:以河南省封丘县为研究区,利用 ArcGIS 9.2 的地统计分析模块研究了该区土壤养分的空间变异性。结果表明,河南省封丘县 0—20 cm 耕层土壤中有机质、速效钾、铵态氮含量(经对数转换后)均服从正态分布,有机质的变异系数最高(0.665 6),铵态氮的居中(0.411 6),速效钾系数最小(0.321 3),均属于中等强度变异。空间结构性分析表明,铵态氮较好地符合指数模型分布,速效钾符合球状模型,有机质符合高斯模型。普通 Kriging 插值的结果可知,有机质、铵态氮空间分布表现为条带状格局,速效钾表现为斑块状的格局。有机质空间分布为沿东北—西南的中间带分布较高;速效钾为中部偏北地区分布较高,东南方向地区分布较低;铵态氮呈现出西北高,东南低的趋势。

关键词:地统计学;空间变异;土壤养分;河南省封丘县

文献标识码:A

文章编号:1000-288X(2012)04-0180-05

中图分类号:S158.3

Geostatistics-based Spatial Variability of Soil Nutrients in Fengqiu County of He'nan Province

XIAO Yan¹, LÜ Xi-jun²

(1. College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China;

2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: With Fengqiu County of He'nan Province as the study area, we use ArcGIS 9.2 statistical analysis module(geostatistical analysis) to investigate the spatial variability of soil nutrients. The results show that each of the nutrients in 0—20 cm soil showed a normal distribution and moderate-intensity variation. Specifically, soil organic matter had the highest coefficient of variation of 0.665 6, ammonium nitrogen had 0.411 6, and potassium(K) had 0.321 3, respectively. Space structural analysis showed that the exponential model fitted best for the distribution of ammonium nitrogen, and the spherical model for K, and the Gaussian model for organic matter. Using ordinary Kriging interpolation, the spatial distribution of organic matter and ammonium nitrogen exhibited banded patterns, while K showed a patchy pattern. The spatial distribution of organic matter was higher along the middle zone along the direction of northeast—southwest, K had higher values in northern central area and lower values in southeast, and ammonium nitrogen was higher in northwest and lower in southeast.

Keywords: geostatistical analysis; spatial variability; soil nutrients; Fengqiu County of He'nan Province

地统计学起源于 20 世纪 60 年代,早期主要应用于研究地质学现象的空间结构和进行空间估值。其创始人 Marheron 将其简单定义为:随机函数在自然现象勘察及估计中的应用。从中可以看出,地统计学主要是利用随机函数对不确定的现象进行探索分析,并结合采样点提供的信息对未知点进行估计和模拟。已有研究表明^[1-2],地统计学是研究土壤属性空间变异或其它农田特征变异定量化的有效方法。地统计

学自引入土壤科学以来,在土壤水分等物理特征方面的研究较多,而对土壤养分化学特征的空间变异研究较少。郭旭东,傅伯杰等^[3]利用变异函数与 Kriging 插值分析对河北省遵化平原的土壤养分进行了时空变异特征分析。苏伟,聂宜民等^[4]利用 Kriging 插值方法研究山东省龙口市北马镇农田土壤养分的空间变异。姚荣江,杨劲松等^[5]针对目前黄河三角洲地区存在的土壤盐渍化问题,使用经典统计学和地统计学

收稿日期:2011-04-07

修回日期:2011-05-13

资助项目:山东自然科学基金项目(ZR2009EL001; ZR2011DQ015)

作者简介:肖燕(1979—),女(汉族),山东省高唐县人,硕士,讲师,主要研究方向为土地利用/覆被变化及其 GIS 空间分析。E-mail:xy790511@163.com。

相结合的方法研究了不同深度土层盐分含量的空间变异特征。运用地统计学直观地表现土壤养分空间变化趋势将为今后的精细农业提供科学参考,在农田面积不断减少的今天,该方面的研究更具现实意义。

1 研究区概况及样品采集

1.1 研究区概况

封丘县位于河南省东北部,东经 $114^{\circ}14'$ — $114^{\circ}45'$,北纬 $34^{\circ}53'$ — $35^{\circ}14'$ 。面积 $1\,220.5\text{ km}^2$,耕地面积 617.33 km^2 。属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 $13.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 615.1 mm 。地处平原,农业种植有得天独厚的优势,盛产作物有小麦、大米、玉米、大豆、谷子、绿豆、棉花、花生、油菜、芝麻等,是全国 100 个商品粮生产县之一。

本研究采用河南省封丘县 2006 年土壤调查数据,对有机质、速效钾、铵态氮土壤养分进行空间变异分析,获得土壤中有机质、速效钾、铵态氮空间变异预测表面。

1.2 样品采集与分析

2006 年,根据不同的土地利用方式,在研究区域内同一水平面上,采用均匀的采样方案,共采取表层(0—20 cm)土壤样品 112 个。以型号为 HT4-TPY-4 的土壤养分速测仪测定表层土壤有机质、速效钾、铵态氮养分含量。采样点的定位使用差分式 GPS,记录采样点的经纬度和高程。

2 土壤养分空间变异分析

2.1 土壤养分的特征分析

利用 ArcGIS 9.2 地统计分析模块中的数据分析工具对封丘县 0—20 cm 耕层土壤中有机质、速效钾、铵态氮进行统计特征分析,以便于选取合适的参数及

方法。利用 Explore Data 模块,确定封丘县土壤数据的属性,探测数据分布、全局和局部异常值、寻求全局的变化趋势、研究空间自相关等^[6-8]。

对封丘县土壤中有机质、速效钾、铵态氮探索分析,由铵态氮数据通过对数变换得到正态的 QQplot 分布图可知,铵态氮是对数正态分布,而数据的正态分布对于克里格差值具有较好的预测效果。分析有机质、速效钾的 QQplot 分布图可知,有机质呈对数正态分布,速效钾呈正态分布。通过数据的三维透视图可识别出有机质在东—西方向上不存在线性趋势,在南—北方向上存在二次分布趋势,表现为中部高,南—北两边相对较低。速效钾在南—北、东—西方向上均存在二次分布趋势,表现为中部高,两边含量少。铵态氮在南—北及东—西方向上均有线性递增的一次分布趋势,表现为西—北方向含量较高,东—南部含量相对较少。然后通过半变异函数/协方差函数的克里格模型模拟来剔除全局趋势。

对土壤有机质、速效钾、铵态氮含量的观测数据进行了一般描述性统计(表 1),从描述性统计结果可以看出,铵态氮、有机质符合对数正态分布,速效钾符合正态分布。标准差与平均值的比值称为变异系数,变异系数(C_v)的大小表示土壤特性空间变异性的^[9]。变异系数 $C_v \leq 0.1$ 时为弱变异性, $0.1 < C_v < 1$ 时为中等变异性, $C_v \geq 1$ 时为强变异性。从表 1 可以看出,封丘县土壤表层有机质的变异系数最高为 0.665 6,铵态氮的居中为 0.411 6,速效钾系数最小为 0.321 3。总体来看,封丘县 0—20 cm 耕层土壤有机质、速效钾、铵态氮均为中等强度变异,表明施肥过程中对这 3 种土壤养分进行精确的优化施肥模式是具有科学意义的,这对于封丘县精细农业的土壤和肥料管理、环境影响以及增加农作物产量均有较大的价值。

表 1 土壤养分统计性描述

养分	样点数	分布类型	最小值	最大值	平均值	变异系数	标准差	偏度	峰度	中值
有机质	110	对数正态分布	0.60	9.32	2.755 3	0.665 6	1.834	1.513 0	5.401 1	2.22
速效钾	112	正态分布	104.00	590.00	284.96	0.321 3	91.547	0.526 7	3.598 1	280.50
铵态氮	109	对数正态分布	1.20	8.90	3.022 5	0.411 6	1.244 1	1.495 6	6.979 3	2.80

2.2 土壤养分空间变异

将所有的样点数据经过数据检验剔除特异值得出数据特征后,分别用不同类型的模型拟合后进行插值,其模型的选择通过 $\gamma(h)$ — h 散点图和各拟合检验参数来进行。半方差函数曲线表示土壤各种指标变量在距离与方向上不同的所有成对点之间的观测值的空间相关性^[10]。通过半方差函数及半方差函数曲线图可以得到 3 个重要的参数,即块金值(nugget)、

基台值(sill)和变程(range)。(1)块金值。在理论上,当采样点间的距离为 0 时,半变异函数值应为 0;但由于存在测量误差和空间变异,使得两采样点非常接近时,它们的半变异函数值不为 0,即存在块金值。(2)基台值。当采样点间的距离 h 增大时,半变异函数 $\gamma(h)$ 从初始的块金值达到一个相对稳定的常数时,该常数称为基台值。(3)变程。当半变异函数的取值由初始的块金值达到基台值时,采样点的间隔距

离称为变程^[11-12]。块金值与基台值之比可表示系统变量的空间相关性程度,如果比值小于 25%,说明变量具有强烈的空间相关性;在 25%~75%之间,变量具有中等的空间相关性;大于 75%时,变量空间相关性很弱^[13-14]。由表 2 可以看出,有机质的空间相关性程度为 0.851 3,铵态氮为 0.948 4,二者具有较弱的空间相关性。速效钾的空间相关性程度为 0.336 3,具有中等的空间相关性。

总体分析,封丘县 0—20 cm 土壤耕层有机质与铵态氮含量变化的空间分布由随机部分引起的空间异质性程度较大,空间相关性很弱。由于这两种养分受诸如施肥、灌溉、耕作措施、种植制度等各种人为活动的影响较大,在以后的农业活动中应该注意人为因素的影响;速效钾中等强度的相关性的影响因素为结构性因素,如:土壤类型、地形、成土母质、地下水位等。

表 2 土壤养分空间相关描述

养分	偏基台值	块金值	基台值	块金值/基台值	步长/m
有机质	0.051 0	0.343 3	0.403 3	0.851 3	3 702.2
速效钾	5 721.0	2 898.4	8 619.4	0.336 3	1 294.9
铵态氮	0.007 2	0.131 8	0.139 0	0.948 4	3 702.2

2.3 土壤养分表面预测图

对实验数据进行分析可知,铵态氮呈对数正态分布、有空间相关、剔除 3 个离群值、南—北及东—西方

向上均有线性递增的一次分布趋势;有机质呈对数正态分布、有空间相关、剔除两个离群值、东—西方向上不存在趋势,在南—北方向上存在二次分布趋势;速效钾呈正态分布、有空间相关、未剔除离群值、南—北、东—西方向上均存在二次分布趋势。决定使用普通克里格方法对有机质、速效钾、铵态氮进行表面预测。

半变异建模过程中有机质、铵态氮拟合半变异模型的规模范围较大,所以步长较大,而速效钾拟合半变异模型的规模范围较小,所取步长相对较小。由表 3 可知,封丘县 0—20 cm 表层土壤养分含量的变程变化范围从速效钾的 4 274.8 m 到土壤铵态氮的 43 883.2 m,变化范围较大;土壤有机质、铵态氮的变程最大,为 43 883.2 m,说明其空间自相关距离较大;速效钾变程较小,约在 4 000~10 000 m,说明速效钾的空间自相关距离相对最小。

计算半方差函数并选择最佳的拟合模型及参数。模型选择合适与否的判断标准为:标准平均值(mean standardized)最接近于 0,均方根预测误差(root-mean-square)最小,平均预测标准差(average standard error)最接近于均方根预测误差(root-mean-square),标准均方根预测误差(root-mean-square standardized)最接近于 1。表 4 为运用不同的半方差模型对河南省封丘县土壤铵态氮、有机质、速效钾含量进行拟和时各检验参数的比较。

表 3 研究区各养分类型的半变异建模分析

养分	模型类型	偏基台值	块金值	步长/m	步长分组	变程/m
有机质	圆形	0.065 2	0.334 8	3 702.2	12	43 883.2
有机质	球形	0.059 6	0.334 1	3 702.2	12	43 883.2
有机质	四球形	0.055 8	0.333 6	3 702.2	12	43 883.2
有机质	五球形	0.053 0	0.333 4	3 702.2	12	43 883.2
有机质	指数模型	0.061 4	0.326 9	3 702.2	12	43 883.2
有机质	高斯	0.060 0	0.343 3	3 702.2	12	43 883.2
速效钾	圆形	1 516.5	7 422.4	1 294.9	12	15 348.8
速效钾	球形	1 674.4	7 107.6	1 294.9	12	12 684.5
速效钾	四球形	1 793.8	6 967.4	1 294.9	12	12 863.4
速效钾	五球形	1 896.6	6 846.9	1 294.9	12	13 007.8
速效钾	指数模型	5 721.0	2 898.4	1 294.9	12	4 274.8
速效钾	高斯	1 453.1	7 296.6	1 294.9	12	9 888.15
铵态氮	圆形	0.009 3	0.131 9	3 702.2	12	43 883.2
铵态氮	球形	0.007 5	0.132 4	3 702.2	12	43 883.2
铵态氮	四球形	0.006 2	0.132 7	3 702.2	12	43 883.2
铵态氮	五球形	0.005 4	0.133 1	3 702.2	12	43 883.2
铵态氮	指数模型	0.007 2	0.131 8	3 702.2	12	43 883.2
铵态氮	高斯	0.007 6	0.133 5	3 702.2	12	43 883.2

表 4 研究区各养分类型插值检验参数

养分项目	普通克里格	标准平均值	均方根预测误差	平均预测标准差	均方根预测误差	标准均方差预测误差
有机质	圆形	-0.053 4	1.880	1.920	-0.071 1	1.010 0
有机质	球形	-0.053 0	1.880	1.910	-0.071 4	1.016 0
有机质	四球形	-0.052 5	1.879	1.900	-0.071 4	1.020 0
有机质	五球形	-0.052 0	1.879	1.894	-0.071 4	1.023 0
有机质	指数函数	-0.051 6	1.875	1.896	-0.071 0	1.021 0
有机质	高斯	-0.052 6	1.885	1.931	-0.070 1	1.006 0
速效钾	圆形	0.989 1	92.730	91.700	0.011 0	1.013 0
速效钾	球形	0.671 4	92.930	91.430	0.007 9	1.017 0
速效钾	四球形	0.779 2	92.970	91.340	0.009 3	1.018 0
速效钾	五球形	0.757 6	92.940	91.290	0.009 2	1.018 0
速效钾	指数	-0.467 7	95.320	91.970	0.000 2	1.026 0
速效钾	高斯	0.472 2	94.600	91.590	0.005 4	1.033 0
铵态氮	圆形	0.000 4	1.190	1.200	-0.001 0	0.959 5
铵态氮	球形	0.000 8	1.189	1.200	-0.009 5	0.959 4
铵态氮	四球形	0.001 1	1.189	1.200	-0.009 2	0.959 1
铵态氮	五球形	0.001 4	1.189	1.201	-0.009 0	0.958 6
铵态氮	指数函数	0.000 1	1.190	1.200	-0.009 4	0.959 8
铵态氮	高斯	0.001 0	1.189	1.203	-0.009 3	0.957 1

2.4 交叉验证

为了得到封丘县 0—20 cm 耕层土壤养分精确地空间分布结果,本研究利用预留的数据采样点对使用的模型进行交叉验证,来比较观测值与预测值的差

别,从而确定哪一个模型更精确。通过交叉验证检验(表 5)以及模型选择判断参数(表 4)分析可知,理论上有有机质符合高斯函数模型、速效钾符合球形模型、铵态氮符合指数函数模型。

表 5 研究区铵态氮交叉验证检验参数

样点号	测量值	圆形模型		球形模型		指数模型		高斯模型	
		预测值	误差值	预测值	误差值	预测值	误差值	预测值	误差值
5	2.90	2.438 0	-0.462 0	2.437 8	-0.462 2	2.438 4	-0.461 6	2.436 2	-0.463 8
26	2.30	2.565 8	0.265 8	2.565 8	0.265 8	2.566 7	0.266 7	2.564 0	0.264 0
37	2.80	2.503 9	-0.296 1	2.504 4	-0.295 6	2.496 7	-0.303 3	2.514 0	-0.286 0
42	2.95	2.482 9	-0.467 1	2.483 5	-0.466 5	2.478 4	-0.471 6	2.489 1	-0.460 9
43	1.90	2.496 0	0.596 0	2.496 1	0.596 1	2.493 4	0.593 4	2.499 4	0.599 4
48	2.75	2.719 3	-0.030 7	2.718 7	-0.031 3	2.723 5	-0.026 5	2.711 8	-0.038 2
52	3.10	2.677 0	-0.423 0	2.676 8	-0.423 2	2.684 5	-0.415 5	2.667 1	-0.432 9
68	3.10	3.027 7	-0.072 3	3.029 4	-0.070 6	3.027 7	-0.072 3	3.034 0	-0.066 0
73	3.40	3.176 8	-0.223 2	3.177 5	-0.222 5	3.173 3	-0.226 7	3.183 0	-0.217 0
84	2.95	2.933 1	-0.016 9	2.933 8	-0.016 2	2.932 0	-0.018 0	2.935 7	-0.014 3

3 结果分析

(1) 利用 ArcGIS 9.2 地统计分析模块分析了河南封丘县土壤养分空间变异特征,得到有机质、速效钾、铵态氮的最佳预测表面(附图 7)。

(2) 河南省封丘县 0—20 cm 耕层土壤中有有机质、速效钾、铵态氮(经对数转换后)均服从正态分布,有机质的变异系数最高为 0.665 6,铵态氮的居中为

0.411 6,速效钾系数最小为 0.321 3,变异系数在 0.321 3~0.665 6 之间,都属于中等强度变异。

(3) 由数据分析可知,有机质的块金值/基台值为 0.851 3,具有较弱的空间相关性。速效钾的块金值/基台值为 0.336 3,具有中等的空间相关性。铵态氮的块金值/基台值为 0.948 4,具有较弱的空间相关性。

(4) 空间结构性分析表明有机质符合高斯模型

分布、速效钾符合球状模型、铵态氮较好地符合指数模型。

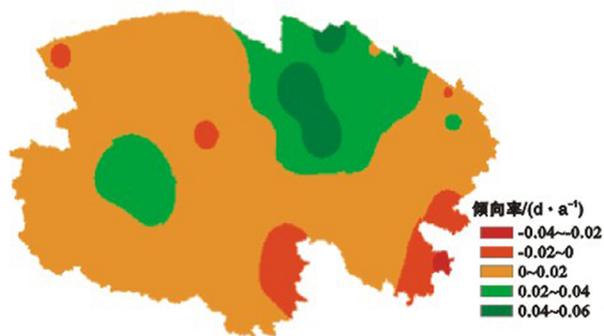
(5) 从普通 Kriging 插值的结果分析可知,封丘县 0—20 cm 耕层土壤中的有机质、铵态氮空间分布表现为条带状格局,速效钾表现为斑块状的格局。有机质空间分布为沿东北—西南的中间带分布较高;速效钾为中部偏北地带分布较高,东南方向分布较低;铵态氮呈现出西北高、东南低的趋势。该分布趋势与三维透视图分析结果一致,但三维透视图只能给出 3 种土壤养分空间变异的趋势,而插值得到的结果直观上给出了空间变化情况。

4 结论

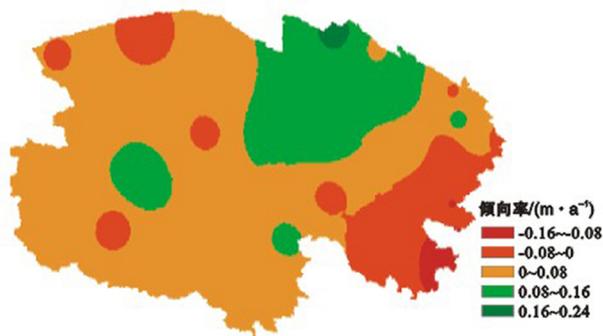
本研究利用半方差函数来描述区域化变量结构性和随机性的空间特征,其中块金系数、基台值、变程作为半方差函数的重要参数,表示区域化变量在一定尺度上的空间变异与相关程度。模型使用普通克里格插值法根据原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量进行无偏最优估值,对河南省封丘县有机质、速效钾、铵态氮的空间变异规律进行了分析,研究表明插值模型的选择对结果的准确性具有重要的意义。通过分析,选用最适宜的模型对研究区进行插值,得出精确的有机质、速效钾、铵态氮空间分布结果。由插值结果知,有机质的空间分布为西南角与中东部地带值达到最大,在 6.649~9.320 g/kg 之间,而东南角上值最低,为 0.600~0.999 g/kg 之间;速效钾的空间分布为中部零散的斑块值较高为 479.107~590.000 g/kg 之间,东南部的值也是最低,为 104.000~178.352 g/kg 之间;铵态氮西北部地带值最高,在 6.517~8.900 g/kg 之间,东南部值最低,在 1.200~1.837 g/kg 之间。综合考虑各养分受施肥、灌溉、耕作措施、种植制度以及结构性因素的影响而导致的变异,在以后的农业活动中应注意人为因素的不合理之处。

[参 考 文 献]

- [1] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties [J]. *Advances in Agronomy*, 1985, 38(3): 44-94.
- [2] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field [J]. *Advance in Soil Science*, 1985, 3: 2-66.
- [3] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征: 变异函数与 Kriging 插值分析 [J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 655-665.
- [4] 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.
- [5] 姚荣江,杨劲松. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究 [J]. *农业工程学报*, 2006, 23(3): 439-445.
- [6] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [7] Oliver M A, Webster R. Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables [J]. *Geogr. Anal.*, 1986, 18(3): 227-242.
- [8] 王伟明. 基于 GIS 的地统计学方法在土壤科学中的应用 [J]. *农业资源与环境科学*, 2007, 23(5): 404-408.
- [9] 李艳,史舟,徐建明. 地统计学在土壤科学中的应用及展望 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 178-182.
- [10] 周慧珍,龚子同. 土壤空间变异性研究 [J]. *土壤学报*, 1996, 33(3): 232-241.
- [11] 张金萍,张保华,秦耀辰. 山东省聊城市耕层土壤养分的空间异质性分析 [J]. *科技导报*, 2009, 27(23): 49-52.
- [12] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 363-428.
- [13] 赵军,张久明,孟凯,等. 地统计学及 GIS 在黑土区域土壤养分空间异质性分析中的应用: 以海伦市为例 [J]. *水土保持学报*, 2004, 24(6): 53-57.
- [14] 贾晓红,李新荣,周海燕,等. 黄灌沙区农田耕层土壤性状空间异质性分析 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 101-104.



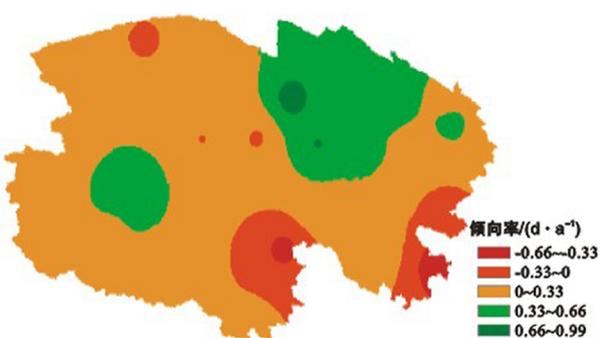
附图1 青海省极端降水天数年际变化空间分布



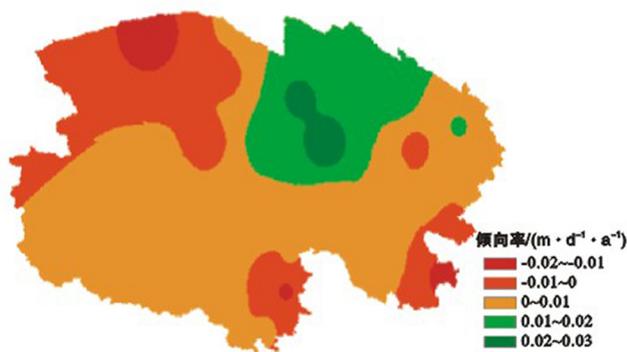
附图2 青海省最大1 d降水量年际变化空间分布



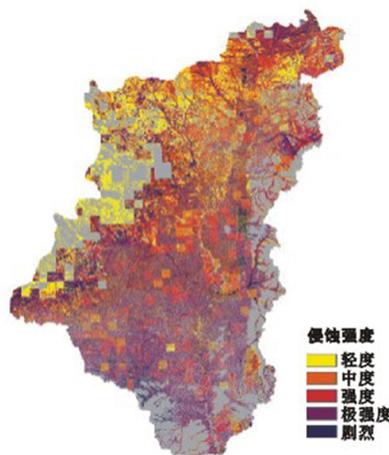
附图3 青海省最大5 d降水量年际变化空间分布



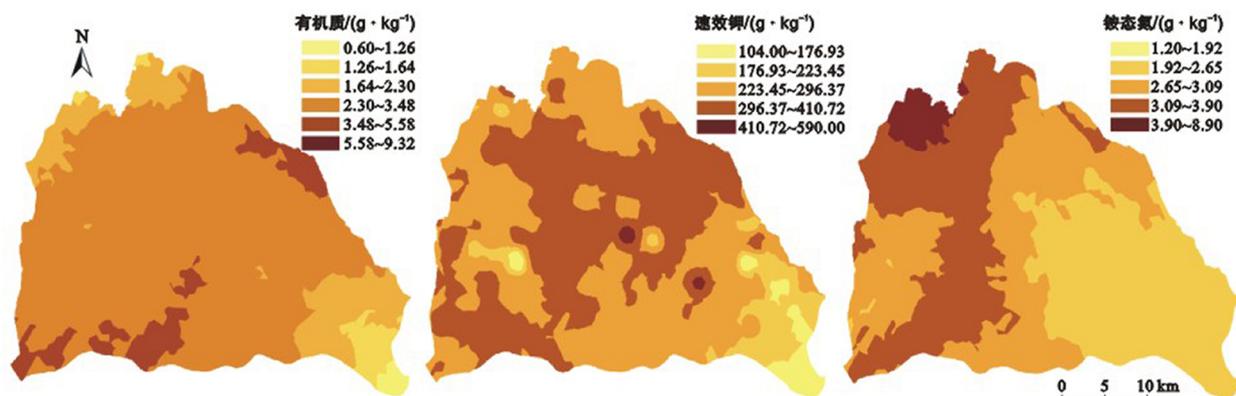
附图4 青海省中雨天数年际变化空间分布



附图5 青海省逐年平均降水强度年际变化的空间分布



附图6 河龙区间土壤侵蚀强度分级



附图7 河南省封丘县土壤养分含量空间变异特征图谱